



Universität Stuttgart



Messung der Partikeltemperatur in einem Zentrifugalreceiver für Solarturmkraftwerke

Studienarbeit

eingereicht von: Julius Schubring
Studiengang: Maschinenbau

eingereicht: Mai 2013

Betreuerin: Dipl. Ing. Wei Wu (DLR)

Kurzfassung

Solarturmkraftwerke bilden eine wichtige Alternative zur kommerziellen Stromerzeugung und zur Erzeugung von Prozesswärme. Um ihre Markt- und Konkurrenzfähigkeit zu steigern, bedarf es jedoch noch intensiven Forschungstätigkeiten in diesem Bereich. In Rahmen der Entwicklung von Solarturmreceivern ist der Zentrifugalreceiver zu nennen, der das Potential für hohe Wirkungsgrade und somit für die Senkung von Stromgestehungskosten birgt. Um die grundlegenden Prinzipien des Konzeptes zu untersuchen und zu bewerten, wurde ein erster Prototyp für eine Eingangsleistung von 15 kW ausgelegt, aufgebaut und getestet. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Bestimmung der Temperatur von kleinen Keramikpartikeln dar, die hier als Wärmeträgermedium im Receiver dienen. Ziel dieser Arbeit bestand daher in der Entwicklung eines geeigneten Temperaturmesssystems im Rahmen der gegebenen Anforderungen und Randbedingungen.

Es wurden verschiedene Konzepte für die Temperaturmessung entwickelt und bewertet. Die erfolgversprechendsten wurden in Versuchen ohne die Einbringung von Wärmestrahlung mithilfe eines Rapid-Prototyping-Modells auf ihre Funktionalität hin getestet. Zur Visualisierung dieser Versuche wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Die durch diese Versuche erlangten Erkenntnisse wurden anschließend in einem Konzept, einem Temperaturmessring (TMR) mit automatisiertem Schließring, zusammengeführt. Dieses wurde im Rahmen von Funktions- und Leistungstests des Receivers mit Hochleistungsstrahlern am DLR in Köln getestet. Die grundlegende Funktionalität des Messsystems konnte dabei gezeigt werden. Des Weiteren belegen erste Vergleiche mit Aufnahmen einer Wärmebildkamera, dass mit beiden Verfahren gemessene Partikeltemperaturen in der gleichen Größenordnung liegen. Es kann daher auf die Richtigkeit des entwickelten Messkonzeptes vertraut werden.

Abstract

Solar Tower Plants are an important alternative to the commercial generation of electricity and process heat. In order to increase their commercial viability and competitiveness intensive research activities are crucial in this area. Within the framework of the development of Solar Tower Receivers, the Centrifugal Particle Receiver has to be mentioned, which has a great potential of high outlet temperatures, therefore high receiver efficiencies leading to reduced levelized electricity costs. For first thermal performance tests of the concept, a prototype with an incoming power of 15 kW has been designed, built and tested. One of the major challenges is to measure the outlet temperature of small particles, which are used as heat transfer media in the receiver. Objective of this work is thus the development of a suitable measurement system considering given boundary conditions and specifications.

Different concepts for the temperature measurement were designed and evaluated. The most promising ones were tested on functionality with a Rapid Prototyping model in experiments without incoming radiation. A high-speed camera was used to visualize this experiments. Using the gained results, a new concept was developed: the Temperature Measurement Ring (TMR) with automated Locking Ring. Its basic functionality could be demonstrated during the proof-of-concept tests of the receiver with the High-Flux-Solar-Simulator at the DLR in Cologne. Furthermore, first comparisons with recordings of a infrared camera indicated that the measured particle temperatures with both methods are in the same order of magnitude. The data measured by the present developed concept can be therefore trusted with sufficient confidence.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind, die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war, dass die Arbeit weder vollständig noch in Teilen bereits veröffentlicht wurde und das elektronische Exemplar mit den anderen (ausgedruckten) Exemplaren übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift

Aufgabenstellung

Messung der Partikeltemperatur in einem Zentrifugalreceiver für Solarturmkraftwerke

In der Gruppe „Punktfokussierende Systeme“ des Instituts für Solarforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) werden neuartige Receiverkonzepte für den Temperaturbereich $> 600^{\circ}\text{C}$ entwickelt. Ein solches Konzept stellt der solare Partikelreceiver dar. Hierbei erfolgt eine direkte Absorption der Solarstrahlung durch Feststoffpartikel, die gleichzeitig als Speichermedium genutzt werden können und somit eine Entkopplung der Stromerzeugung von der momentan verfügbaren Solarstrahlung ermöglichen. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Partikelreceiver im Vergleich zu anderen Receiverkonzepten das Potential für höhere Wirkungsgrade und niedrigere Kosten haben. Eine Weiterentwicklung dieser Technologie ist daher vielversprechend im Hinblick auf die Senkung von Stromgestehungskosten und der Wettbewerbsfähigkeit solarthermischer Kraftwerke.

Arbeitsschritte:

1. Entwicklung verschiedener Konzepte für die Messung der Partikeltemperatur in einem rotierenden Zentrifugalreceiver
2. Literaturrecherche vorhandener Konzepte und der Grundlagen der Temperaturmessung von Schüttgütern
3. Konstruktion der entsprechenden Bauteile in CAD
4. Fertigung / Bau von Prototypen
5. Experimentelle Untersuchung der verschiedenen Konzepte beim unbeheizten Receiver: Proof-of-concept
6. Qualitative Aufnahmen der Partikelbewegung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera

-
7. Ermittlung der Partikeltemperatur (bis zu 1000 °C) beim mit Hochleistungsstrahlern beheizten Receiver
 8. Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse

Betreuerin:

Dipl.-Ing. Wei Wu

DLR Stuttgart
Institut für Solarforschung
Pfaffenwaldring 38 / 40
70569 Stuttgart

Tel. 0711 / 6862-645
Fax. 0711 / 6862-8032
email: wei.wu@dlr.de

Nomenklatur

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
TMR	Temperaturmessring
ϑ_v [$^{\circ}C$]	Vergleichstemperatur eines Thermoelementes
ϑ_m [$^{\circ}C$]	Temperatur des zu messenden Körpers
U_{th} [V]	Thermospannung eines Thermoelementes
R [m]	Radius eines Partikelvolumens um ein Thermoelement
d [m]	Durchmesser eines Thermoelementes an der Spitze
ϵ	Emissionsgrad des zu messenden Körpers
E_s [W/m^2]	abgestrahlte spezifische elektromagnetische Strahlung eines schwarzen Körpers
C_s [$W/(m^2 \cdot K^4)$]	Konstante des schwarzen Strahlers
T_s [$^{\circ}C$]	Temperatur des schwarzen Körpers
E [W/m^2]	abgestrahlte spezifische elektromagnetische Strahlung eines beliebigen Körpers
T [$^{\circ}C$]	Temperatur eines beliebigen Körpers
$v_{Partikel,1}$ [m/s]	Geschwindigkeit der Partikel vor der Messkammer
$v_{Partikel,2}$ [m/s]	Geschwindigkeit der Partikel in der Messkammer
$v_{Partikel,3}$ [m/s]	Geschwindigkeit der Partikel nach der Messkammer
LabView	objektorientiertes Programm für die Messdatenerfassung
Wlan	drahtlose Datenverbindung
COM	serieller Kommunikationsschnittstelle für die Datenübertragung
TE	Thermoelement

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
Erklärung	4
Aufgabenstellung	5
Inhaltsverzeichnis	8
1 Nutzung der Sonnenenergie	10
2 Der Zentrifugalreceiver	12
2.1 Stand der Technik	13
2.2 Aufbau und Funktionsweise	14
2.3 Prototyp	15
2.3.1 Partikelbewegung	16
2.3.2 Temperaturmessung der Partikel	18
3 Temperaturmessung bei Schüttgütern	19
3.1 Berührungsthermometer	19
3.2 Strahlungsthermometer	21
4 Konzepte für die Temperaturmessung	24
4.1 TMR mit senkrechten Messkammern	24
4.1.1 Funktionsweise	24
4.1.2 Bewertung	25
4.2 TMR mit Messschacht	26
4.2.1 Funktionsweise	26

4.2.2	Bewertung	27
4.3	TMR mit Schaber	27
4.3.1	Funktionsweise	27
4.3.2	Bewertung	28
4.4	TMR mit außen liegenden Messkammern	29
4.4.1	Funktionsweise	29
4.4.2	Bewertung	29
4.5	Drehbehälter	30
4.5.1	Funktionsweise	30
4.5.2	Bewertung	31
4.6	Verzögerungsring	32
4.6.1	Funktionsweise	32
4.6.2	Bewertung	32
4.7	Überblick und Auswahl	33
5	Funktionstests	35
5.1	Verzögerter Partikelmassenstrom	36
5.2	Impulsstöße	40
5.3	Außen liegende Messkammern	44
6	TMR mit automatisiertem Schließring	46
6.1	Funktionsweise	46
6.2	Automatisierung	49
6.3	Temperaturmessung	50
6.3.1	Massenstrom: 10 g/s	51
6.3.2	Massenstrom: 5 g/s	53
6.3.3	Vergleich mit Aufnahmen der Wärmebildkamera	55
7	Zusammenfassung und Ausblick	57
	Literaturverzeichnis	60
	Abbildungsverzeichnis	62
	Anhang	63

Kapitel 1

Nutzung der Sonnenenergie

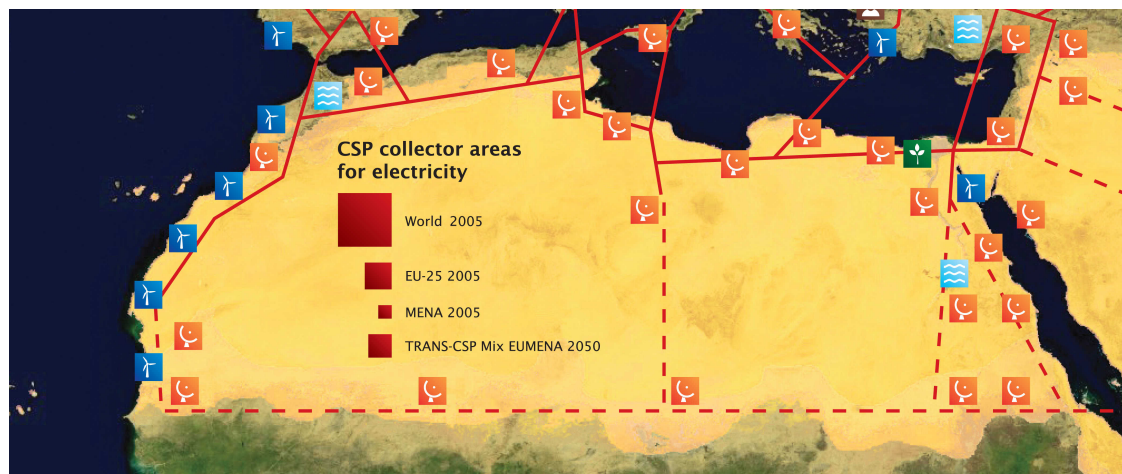


Abbildung 1.1: Weltweiter elektrischer Energiebedarf [1]

Das solare Strahlungsangebot ist für menschliche Begriffe unerschöpflich. Das in Abbildung 1.1 größte rote Quadrat stellt die Fläche dar, die für die Deckung des weltweiten elektrischen Energiebedarfs im Jahre 2005 nötig gewesen wäre, wenn die gesamte durch solare Einstrahlung auf die Erde eingebrachte Energie genutzt worden wäre. Doch wie kann man diese Energie nutzbar machen?

Dies ist eine der großen aktuellen Herausforderungen. In der momentanen Forschung und Entwicklung gibt es dazu die unterschiedlichsten Ansätze. Es gibt generell zwei Unterscheidungskriterien verschiedene Techniken auf diesem Gebiet voneinander abzugrenzen. Zum Einen gibt es die Aufteilung nach dem Endprodukt, wie z.B. Wärme, Kälte

oder Elektrizität. Zum Anderen wird nach dem angewendeten Verfahren aufgeteilt. Hier sind thermische Verfahren und die Photovoltaik als Hauptvertreter zu nennen. [8]



Abbildung 1.2: *Solarturm des DLR in Jülich [2]*

Ein Vertreter der thermischen Verfahren stellen z.B. Solarturmkraftwerke dar. Bei diesem Kraftwerkskonzept wird solare Strahlung über ein Kollektorfeld aus Heliostaten auf einen Punkt, dem Brennpunkt, am Solarturm fokussiert. Im Brennpunkt befindet sich ein sogenannter Receiver, der die Energie der Solarstrahlung über ein Wärmeträgermedium aufnimmt und speichert. Für einen solchen Receiver gibt es bereits verschiedene Konzepte, die mit unterschiedlichen Wärmeträgermedien agieren. Die am meisten verwendeten Wärmeträgermedien sind Luft, Wasser, Hochtemperaturöl und Salzschnmelze [6]. Mit dem Solarturm ist es möglich Wärme, die für industrielle oder verfahrenstechnische Prozesse benötigt wird, aber auch elektrische Energie zu erzeugen. Ein großer Vorteil de Solarturms ist es, dass die Sonnenenergie als Wärme gespeichert werden kann, um unabhängig der Tageszeit und je nach Bedarf Strom zu liefern.

Ein vielversprechendes Receiverkonzept, welches sowohl für die Bereitstellung von Prozesswärme, als auch zur Stromerzeugung geeignet ist, wird gerade am deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt. Dieses verspricht hohe Receiverauslasstemperaturen und ein Potential für hohe Wirkungsgrade.

Kapitel 2

Der Zentrifugalreceiver

Der Zentrifugalreceiver ist ein solarthermischer Partikelreceiver für Solarturmkraftwerke. Das verwendete Wärmeträgermedium sind keramische Bauxitpartikel, die ursprünglich für die Ölindustrie hergestellt werden. Bei Partikelreceivern besteht der Vorteil gegenüber konventionellen Receivern, die mit Wasser oder Luft als Wärmeträgermedium agieren, in der hohen maximalen Endtemperatur der Partikel, die durch deren direkte Bestrahlung erreicht wird. Dabei können Temperaturen bis zu $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. In konventionellen Receivern fließt das Wärmeträgermedium beispielsweise durch Rohre, wodurch die Temperaturen hier durch den Werkstoff der Rohre limitiert sind. Sie werden also indirekt bestrahlt.

Partikelreceiver können auch für die Bereitstellung von Prozesswärme und bei verfahrenstechnischen Prozessen im Hochtemperaturbereich verwendet werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der direkten Nutzbarkeit der Partikel als Speichermaterial. Somit kann ein Wärmeübertrager eingespart werden. Der in dieser Arbeit verwendeter Receiver ist ein neuer Receivertyp, der die Zentrifugalkräfte in einem rotierenden Zylinder ausnutzt, um einen dünnen, dichten Partikelfilm an der Receiverwand zu erzeugen.

Im Folgenden wird zunächst kurz auf weitere Konzepte für Partikelreceiver eingegangen.

2.1 Stand der Technik

Das Konzept des Fallfilmreceivers wird schon seit den 90er Jahren untersucht. Bei Fallfilmreceivern wird ein geschlossener Partikelfilm erzeugt der durch die Gravitationskraft nach unten fällt. Durch die Apertur gelangt konzentrierte Solarstrahlung auf den Partikelfilm. Die aufgeheizten Partikel werden nach unten abgeführt und mechanisch weitergeleitet [3].

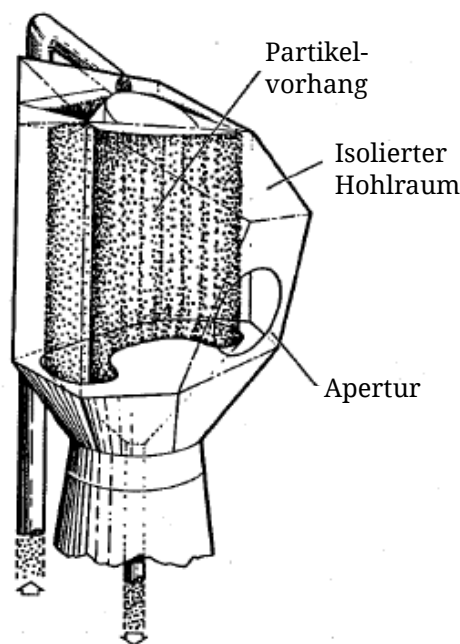


Abbildung 2.1: *Aufbau und Funktionsweise des Fallfilmreceivers [3]*

Dieses System zeichnet sich vor Allem durch seinen einfachen und robusten Aufbau aus. Im Teillastbereich treten allerdings Schwierigkeiten auf, da dieser nur über einen verringerten Massenstrom realisiert werden kann. Dadurch kann es zu Lücken im Partikelfilm kommen, so dass die Solarstrahlung nicht vollständig von den Partikel absorbiert werden kann [3].

Weitere Konzepte, wie der Fließfilmreceiver oder der Drehrohrreceiver wurden in einer Konzeptstudie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt vorgestellt [3].

2.2 Aufbau und Funktionsweise

Der Zentrifugalreceiver besteht aus einem Zylinder der in Rotation versetzt wird und dessen Rotationsachse in einem Winkel zwischen 10° und 90° zur Horizontalen eingestellt werden kann. Die als Wärmeträgermedium verwendeten Partikel werden dem Receiver durch den oberen Einlass zugeführt und aufgrund der Zentrifugalkraft an die Wand des Receivers gedrückt. Dabei bilden sie einen dünnen und optisch dichten Film, der durch die Gravitationskraft langsam nach unten wandert. Die einfallende, hochkonzentrierte solare Strahlung erhitzt die Partikel auf ihrem Weg durch den Receiver, wie in Abbildung 2.2 dargestellt ist [9].

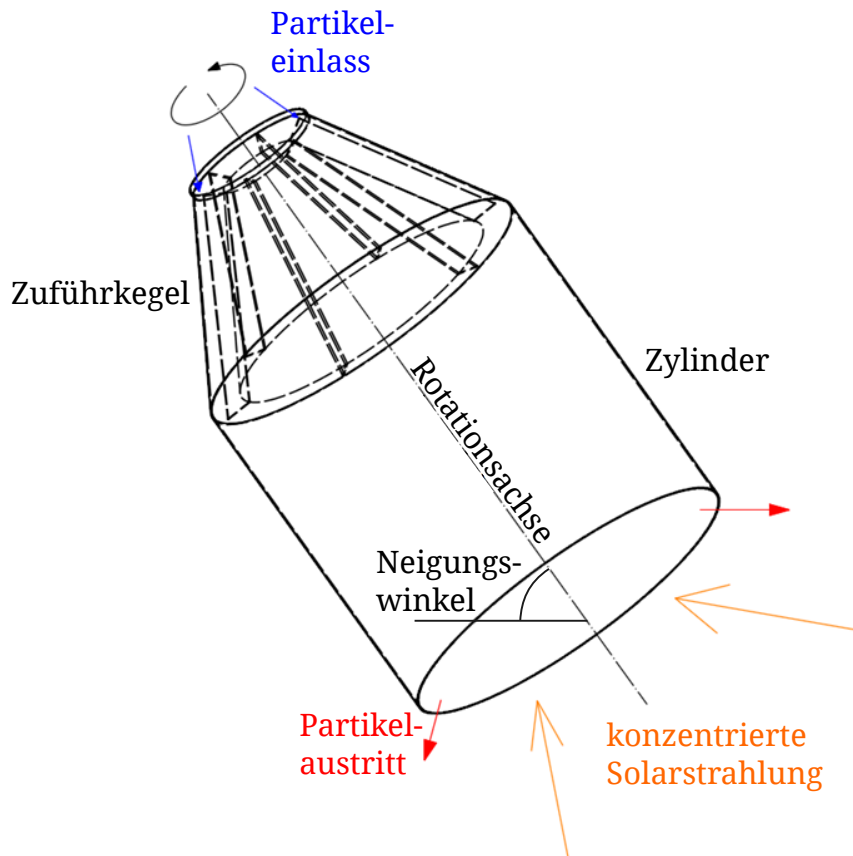


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau des Zentrifugalreceivers [9]

Der Zentrifugalreceiver hat gegenüber anderen Partikelreceivern verschiedene Vorteile.

Zum Einen kann man durch Einstellen der Rotationsgeschwindigkeit die Verweildauer der Partikel im Receiver beeinflussen und den Partikelmassenstrom und somit den Receiver auf die gegebene solare Einstrahlung anpassen. Dadurch ist es möglich die Austrittstemperatur der Partikel auf einem konstanten Temperaturniveau zu halten. Des Weiteren kann angenommen werden, dass ein Verschleiß der Keramikpartikel aufgrund der geringen Relativbewegung zwischen Partikeln und Receiverinnenwand eher zu vernachlässigen ist. Mit geeigneten mechanischen Maßnahmen kann auch ein Verschleiß der Partikel beim Receiveraustritt entsprechend minimiert werden. [9].

Im ersten Entwicklungsschritt, in dem die grundlegende Funktionen des Receivers untersucht und gezeigt werden sollen, wurde ein erster Prototyp entwickelt. Aufbau und Funktionsweise wird im Folgenden näher erläutert.

2.3 Prototyp

Der Prototyp besteht im Wesentlichen aus einem Rohr, dem sogenannten Inliner, der über zwei Halteringe mit dem Gehäuse verbunden ist und das Herzstück des Receivers darstellt. Über dem Rohr befindet sich ein doppelwandiger Kegel, in dem zwischen den beiden Wänden des Kegels, Rippen eingezogen sind, die sich nach unten in einem zylindrischen Teil fortsetzen. Der Kegel ist nach oben hin offen und ist für die Beschleunigung der Partikel auf Umfangsgeschwindigkeit zuständig. In dieser Öffnung befindet sich ein Zuführrohr, dass bis zum oberen Ende des Receivergehäuses geführt wird und dort austritt. Um die Wärmeverluste gering zu halten, ist der Hohlraum zwischen Inliner, Kegel, Zuführrohr und dem äußeren Gehäuse mit Isolierung ausgefüllt.

Das Gehäuse ist im obere Teil mit einem Kugellager, das alle axialen und einen Teil der radialen Kräfte aufnimmt, am Halterahmen befestigt. Oberhalb des Lagers befindet sich ein Zahnscheibe. Über den angeschlossenen Zahnriemen sind der Receiver und der Motor, der sich fest am Rahmen befindet, verbunden. Dies stellt den Antrieb des Receivers dar, der diesen in Rotation versetzt.

Um das Receivergehäuse herum, befindet sich ein Führungsring auf dem drei Hartgummi-Rollen laufen. Diese Rollen sind auch am Halterahmen montiert und nehmen die radialen Kräfte im unteren Teil des Receivers auf. Zugleich sind sie für die radiale Justierung nötig

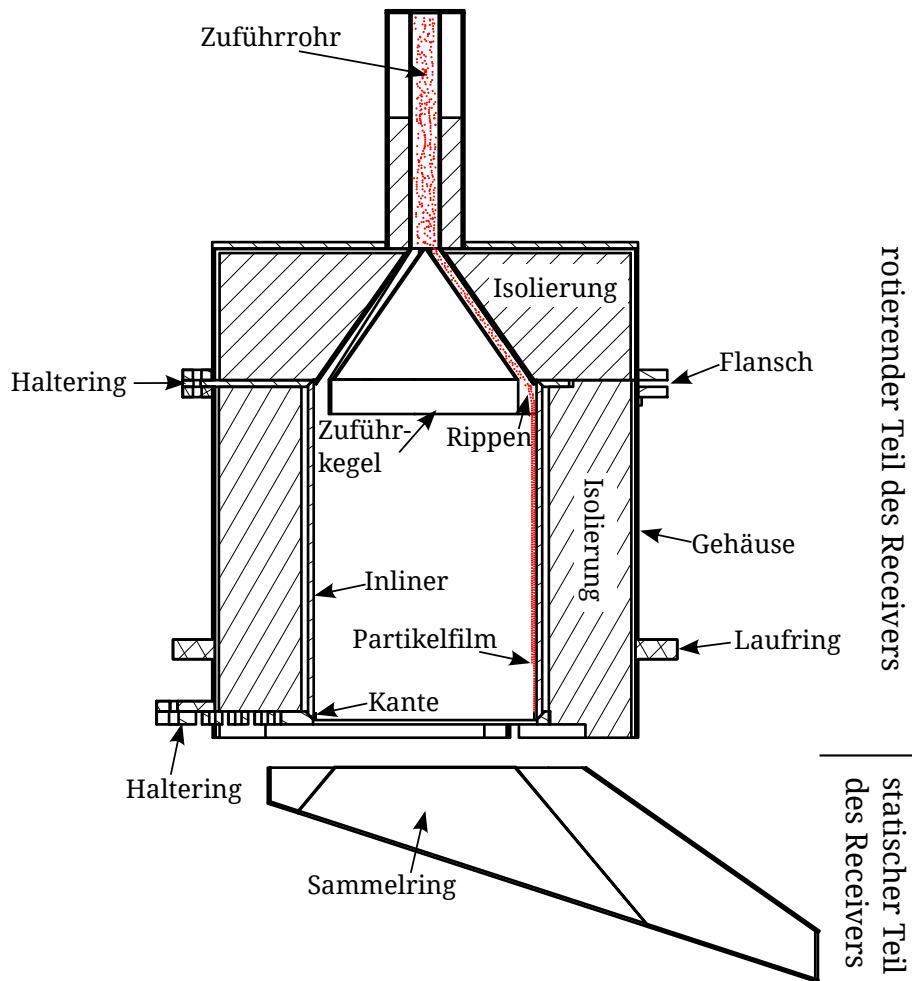


Abbildung 2.3: Aufbau des Receivers im Schnitt

und garantieren somit den Rundlauf des Receivers. In der Mitte des Receivers befindet sich ein Flansch, der oberen und unteren Teil des Receivergehäuses verbindet.

Unterhalb des Receivers befindet sich der Sammelring, der nicht rotiert und die aus dem Receiver austretenden Partikel auffängt. Er muss dabei möglichst nah und präzise an dem rotierenden Receiver positioniert sein, um Partikelverlust zu vermeiden.

2.3.1 Partikelbewegung

Über dem Zuführrohr werden Partikel mit einem durchschnittlichen Durchmesser von $1,2\text{ mm}$, in den Kegel eingeleitet und erfahren dort eine Drallzufuhr. Die drallbehaf-

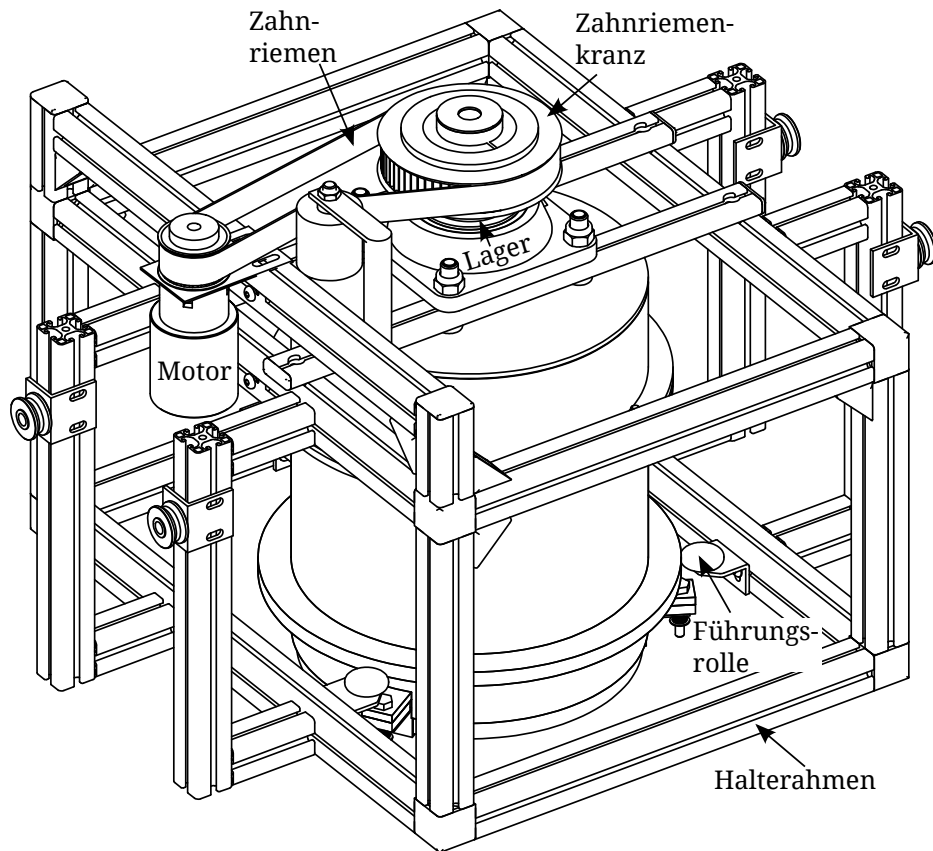


Abbildung 2.4: *Aufbau des Receivers im Rahmen*

teten Partikel bewegen sich nun aufgrund der Gravitationskraft im Kegel nach unten. Erste qualitative Aufnahmen der Partikelbewegung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera haben gezeigt, dass sobald die Partikel aus dem Kegel austreten, sie sich an die Wand des Receivers anlegen. Die ersten Partikel laufen die Inlinerwand bis zur Kante und werden dort aufgestaut. Diese Stauung wächst bis zum unteren Ende des Kegelaustrittes. Somit hat sich eine stationäre Partikelschicht an der Wand des Receivers gebildet, die hier als Grundsicht bezeichnet wird. Alle nachfolgenden Partikel, die aus dem Kegel austreten, wandern nun auf dieser Grundsicht langsam nach unten. Dieser Ablauf ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Je nach Drehzahl und Massenstrom gibt es einen ein- oder mehrlagigen Partikelfilm, einen dichten oder einen lückenbehafteten Film. Für einen optimalen Betrieb des Receivers sollte immer ein einlagiger, dichter Film angestrebt werden.

2.3.2 Temperaturmessung der Partikel

Um die Temperaturen im Receiver überwachen zu können, wurden Thermoelemente zwischen Inliner und Isolierung, im Kegel und im Sammelring positioniert. Das Datenerfassungssystem ist ebenfalls Teil des rotierenden Receivers und wird über eine Lithiumpolymer-Batterie mit Strom versorgt. Die aufgezeichneten Temperaturdaten werden per WLAN an den Messrechner übertragen und dort mit einem Messprogramm in LabView aufgenommen und ausgewertet.

Mit diesem Messsystem können die Temperaturen der Receiverwand gut analysiert werden. Es ist allerdings bislang noch nicht möglich gewesen, die direkten Austrittstemperaturen der Partikel aus dem Receiver zu messen, die eine wichtige Variable bei der Bestimmung des Receiverwirkungsgrades darstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein spezielles Temperaturmessverfahren entwickelt, aufgebaut und getestet, das den gegebenen Anforderungen genügt. Dabei musste beachtet werden, dass das System kompakt und robust ist, da am Prototypen wenig Bauraum zur Verfügung steht. Außerdem müssen die Kriterien erfüllt werden, die für eine Temperaturmessung von Schüttgut zu beachten sind, da kein kontinuierliches Fluid vorliegt.

Kapitel 3

Temperaturmessung bei Schüttgütern

Die Verfahren Temperaturen zu bestimmen lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen aufteilen, die Berührungsthermometer und die berührungslosen Strahlungsthermometer. Daneben existieren noch Sonderverfahren, die hier allerdings nicht betrachtet werden. Eine Übersicht dieser Verfahren ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

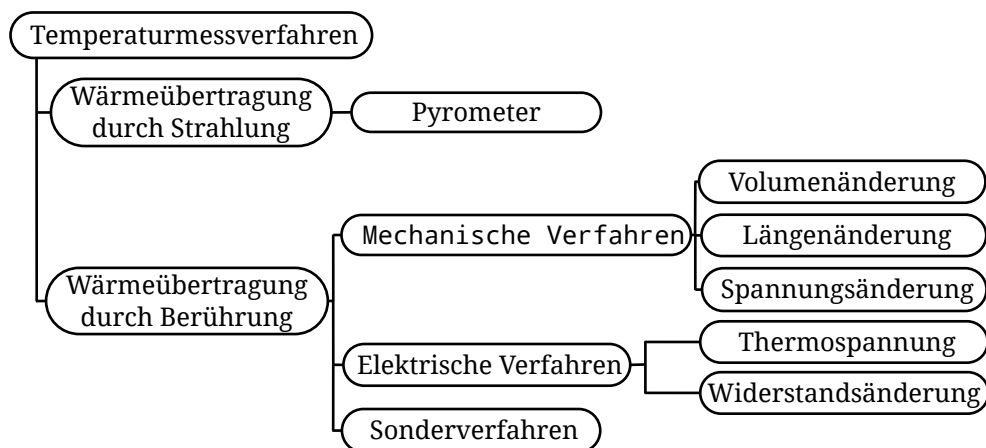


Abbildung 3.1: Übersicht der Temperaturmessverfahren [5]

3.1 Berührungsthermometer

Mechanische Verfahren eignen sich aufgrund der hohen Temperaturen bei Partikelrezeivern nicht für Bestimmung der Partikeltemperatur und werden deshalb nicht weiter betrachtet. Dies gilt ebenso für die Temperaturmessung mit der Widerstandänderung.

Zu den meist verwendeten Berührungsthermometern in Wissenschaft und Forschung zählen die Thermoelemente, die auf dem thermoelektrischen Seebeck-Effekt basieren. Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, besteht ein Thermoelement aus zwei verschiedenen Materialien, das jeweils einen Messschenkel bildet. Beide Materialien bilden zusammen ein Thermopaar. An der Messspitze des Thermoelementes werden die beiden Materialien zusammengeführt. Am anderen Ende der Messschenkel befindet sich die Vergleichsstelle, an der die Vergleichstemperatur ϑ_v messen wird. Über die Differenz der zu messenden Temperatur ϑ_m und ϑ_v ergibt sich die Thermospannung U_{th} . im Umkehrschluss bedeutet dies, dass man ϑ_m aus U_{th} und ϑ_v errechnen kann. [5]

Für die im Zentrifugalreceiver angestrebten Temperaturen von bis zu 1000 °C gibt es verschiedene Thermopaare, die verwendet werden können. Diese sind Typ K mit einem Thermopaar aus NiCr und NiAl und Typ N mit einem Thermopaar aus NiCr und NiSi [5]. Allerdings verhält sich letzteres bei hohen Temperaturen genauer und ist beständiger.

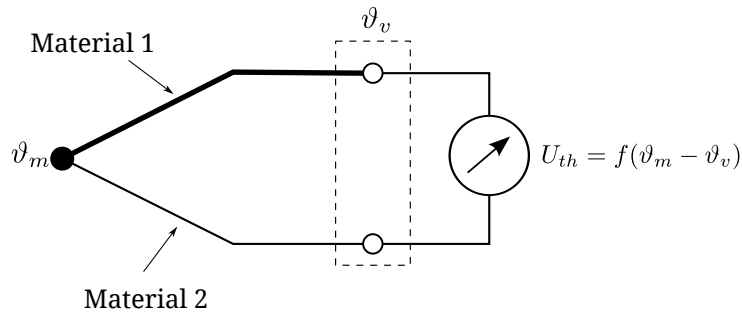


Abbildung 3.2: Grundsaltung eines Thermoelementes [5]

In der Literatur finden keine Messverfahren, die für die Temperaturmessung von Partikeln in dünnen Schichten, wie sie im Zentrifugalreceiver vorkommen, angewendet werden können. Deshalb wurde die Temperaturmessung der Partikel die Maßgaben für die Temperaturmessung in Festkörpern verwendet. Bei der Temperaturmessung muss beachtet werden, dass die Messspitze des Thermoelementes von einem genügend großen Volumen der zu messenden Partikel umgeben ist. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Radius R des Partikelvolumens mindestens das fünffache des Durchmesser d des Thermoelementes aufweist. Dies ist in Abbildung 3.3 zu sehen. [4]

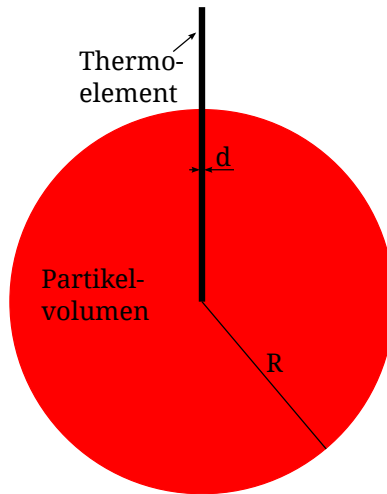


Abbildung 3.3: richtige Position der Thermoelementspitze im Partikelvolumen

3.2 Strahlungsthermometer

In der Gruppe der berührungsfreien Verfahren mithilfe von Strahlung ist das Pyrometer zu nennen. Dieses kann die abgestrahlte elektromagnetische Energie eines Körpers messen unter Berücksichtigung des Emissionsgrade ϵ des Körpers seine Temperatur bestimmen [5]. Grundlage hierfür ist das Stefan-Boltzmann-Gesetzes, das das Strahlungsverhalten eines Schwarzen Strahlers beschreibt:

$$E_s = C_s \cdot \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 [4] \quad (3.1)$$

mit

E_s : abgestrahlte spezifische elektromagnetische Strahlung eines schwarzen Körpers

$C_s = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

T_s : Temperatur des schwarzen Körpers

Durch die Verrechnung von E_s mit ϵ kann die abgestrahlte spezifische Energie eines beliebigen Körpers E bei der Temperatur T ermittelt werden [4]:

$$E = \epsilon \cdot E_s [4] \quad (3.2)$$

Der grundsätzliche Aufbau eines Strahlungspyrometers ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die eintreffende Strahlung wird von der Linse gebündelt. Anschließend wird die Strah-

lungintensität von einem Schwächungsmittel, wie Blende oder Grauglas, auf den für den Strahlungssensor nötigen Intensitätsbereich gebracht. Dieser Aufbau kann noch durch einen Filter erweitert werden, um den Spektralbereich der Strahlung einzuschränken [4].

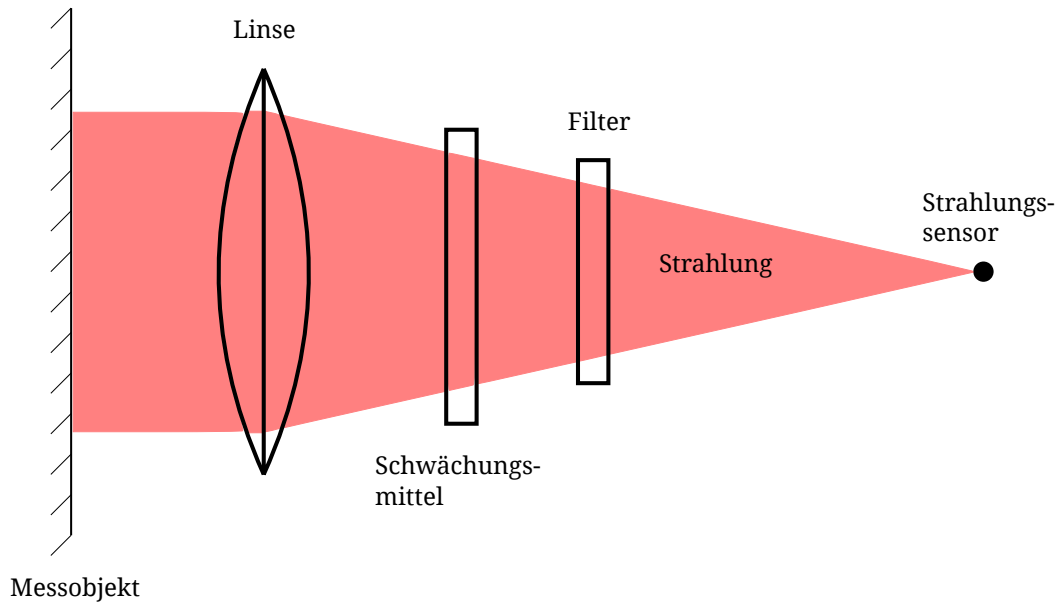


Abbildung 3.4: *prinzipieller Aufbau eines Pyrometers [4]*

Wie man aus Gleichung 3.2 erkennen kann, ist die Temperaturmessung stark vom Emissionsgrad abhängig. Dieser ist allerdings für die aufgeheizten Partikel nicht genau bekannt. Somit sollte ein Temperaturmessverfahren basierend auf Strahlung nur zur Überprüfung der Ergebnisse einer Partikeltemperaturmessung verwendet werden.

Eine Technik die nicht nur die lokale Temperaturen auf einem Messobjekt, sondern eine bildliche Darstellung der Temperaturverteilung an dem zu messenden Objekt bestimmen kann, ist die Thermographie. Die hierbei eingesetzte Wärmebildkameras wandeln, die vom Messobjekt ausgesandte infrarote Wärmestrahlung in ein optisches Bild um. Für digitale Geräte werden größtenteils elektronenoptische Bildwandler verwendet. Für die Thermographie muss der Emissionsgrad des Messobjektes jedoch genauso bekannt sein wie bei einem Pyrometer. Daher kann auch diese Technik wie schon oben beschrieben nur zur Validierung der gemessenen Partikeltemperaturen verwendet werden [7].

Aus den in diesem Kapitel betrachteten Temperaturmessverfahren konnte gezeigt werden, vorerst nur ein Messverfahren mit Berührungsthermometern für die Bestimmung der Partikeltemperatur geeignet ist. Die in Kapitel 3.1 aufgeführte Bedingung für die Messung in festen Körpern muss aber für eine korrekte Temperaturbestimmung beachtet werden. Die Thermographie wird wie in Kapitel 3.2 beschrieben nur für einen ersten qualitativen Vergleich der gemessenen Partikeltemperatur verwendet.

Kapitel 4

Konzepte für die Temperaturmessung

Für die Messung der Partikelaustrittstemperaturen am Prototypen des Zentrifugalreceiver mithilfe von Thermoelementen gibt es zwei grundlegende Prinzipien.

Das erste ist die Partikeltemperatur direkt am rotierenden Receiver zu messen. Dies wird im Folgenden als dynamische Temperaturmessung bezeichnet. Man kann diese noch in eine kontinuierliche und in eine periodische Temperaturmessung unterscheiden. Bei der kontinuierlichen wird zu jeder Zeit die Temperatur der Partikel gemessen. Dies setzt einen ständigen Austausch der Partikel um die eingesetzten Thermoelemente voraus, damit keine Temperaturänderung durch Partikelabkühlung bei der Messung auftritt. Bei der periodischen Temperaturmessung findet die Messung immer nach einem bestimmten Zeitintervall statt. Hierbei werden die Partikel zunächst gestaut, um dann wieder entleert zu werden.

Das zweite Prinzip ist die Temperaturmessung der Partikel außerhalb des rotierenden Receivers, im Folgenden statische Temperaturmessung genannt, die sich ebenfalls in eine kontinuierliche und periodische Messung einteilen lässt.

In diesem Kapitel werden nun mögliche Konzepte, die für die Messung der Partikeltemperatur entwickelt wurden, beschrieben und es wird eine erste Bewertung vorgenommen.

4.1 TMR mit senkrechten Messkammern

4.1.1 Funktionsweise

Das Konzept dieses Temperaturmessringes (TMR) verfolgt das Prinzip eines verzögerten Partikelflusses. Diese Verzögerung wird durch die sich verjüngenden Messkammern er-

reicht, in denen sich die Partikel anstauen sollen, um das benötigte Partikelvolumen für die Temperaturmessung mit Thermoelementen aufzubauen. Der genaue Aufbau des TMR ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Für die Geschwindigkeit der Partikel vor, in und nach der Messkammer gilt $v_{\text{Partikel},1} > v_{\text{Partikel},2} < v_{\text{Partikel},2}$ (vgl. Abbildung 4.1). Durch den verzögerten Partikelfluss in den Messkammern, läuft diese nach einer bestimmten Zeit über. Die überlaufenden Partikel gelangen in die Hauptkammern, in denen Sie mit den restlichen Partikeln zusammengeführt und durch den Auslass abgeführt werden. Die Hauptkammern sind derart dimensioniert, dass in ihnen keine Verzögerung des Partikelflusses stattfindet. Dies muss unbedingt gewährleistet sein, um ein Überlaufen der Partikel durch die Apertur zu verhindern.

Die Messspitzen der Thermoelemente sind in den Messkammern so eingebaut, dass sich darum ein Volumen aus 3 – 5 Partikelschichten befindet, wodurch die Temperaturmessung korrekt und möglichst genau durchgeführt werden kann.

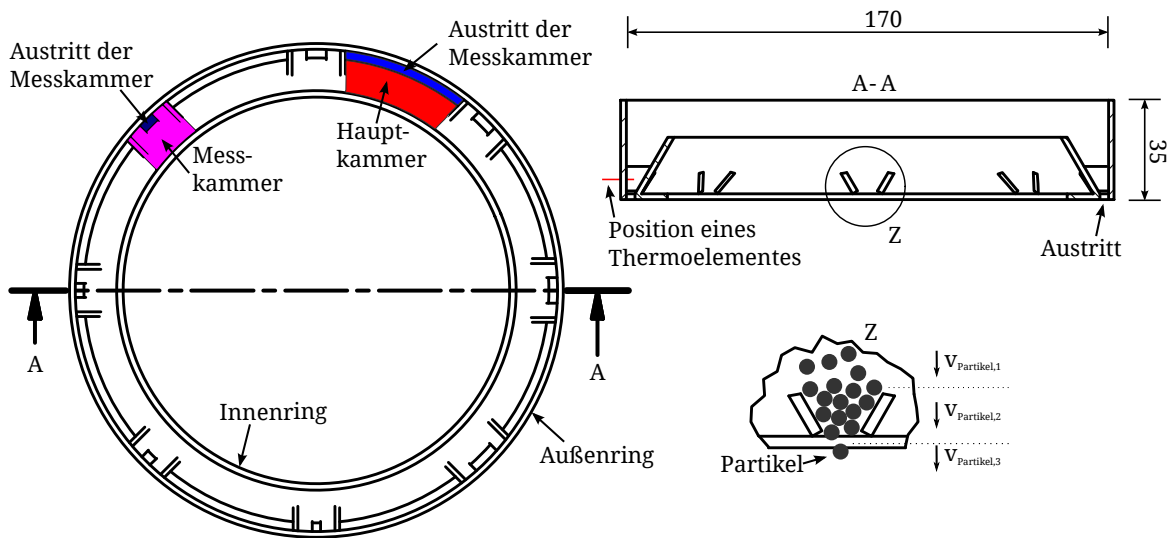


Abbildung 4.1: Aufbau des TMR mit senkrechten Messkammern

4.1.2 Bewertung

Das Konzept des verzögerten Partikelflusses ermöglicht eine kontinuierliche Messung der Partikeltemperatur. Dies stellt einen Vorteil gegenüber periodischen Messverfahren dar, weil eine zeitlich durchgängige Messung der Partikeltemperatur gewährleistet werden

kann.

Für die Fertigung dieses TMR-Konzeptes ist von Vorteil, dass die einzige Komponente die mit hoher Präzision gefertigt werden muss, der Messkammernaustritt ist, um den benötigten Querschnitt zu erhalten. Der Innen- und Außenring des TMR können mit geringerer Präzision gefertigt werden, was einen großen Zeit- und Kostenvorteil mit sich bringt. Im Zusammenbau ergibt sich noch der Vorteil, dass man nur eine Komponente hat, die an den Receiver montiert werden muss. Allerdings muss der benötigte Austrittsquerschnitt erst durch Versuche ermittelt werden. Da mit diesem Konzept verschiedene Partikelmassenströme getestet werden sollen, sind auch unterschiedliche Austrittsquerschnitte für einen TMR oder unterschiedliche TMR möglich. Bei Letzterem müsste man vor jedem Betrieb mit einem anderen Massenstrom allerdings einen Austausch des TMR vorsehen, was mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden wäre.

4.2 TMR mit Messschacht

4.2.1 Funktionsweise

Das selbe Prinzip, dass in 4.1 beschrieben wurde, kann auch ohne eingrenzende Messkammern realisiert werden, wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist. Dabei muss der Spalt so gewählt werden, dass ein verzögerter Partikelmassenstrom im gesamten Schacht erreicht wird. Sollte der Messschacht so hoch mit Partikel gefüllt werden, dass dieser überlaufen würde, fallen Partikel durch die Apertur. Dies muss vermieden werden, da sonst ein hoher Partikelverlust die Folge wäre. Um dies zu verhindern, wurden Auslassschlitze in die Außenwand des TMR platziert, die als Überlauf fungieren. Ein zusätzlicher Außenring sorgt für den Ablauf der Partikel. Durch die Zentrifugalkraft werden die überlaufenden Partikel durch die Auslassschlitze nach außen gedrückt. Für den Fall das springende Partikel trotzdem nach innen durch die Apertur fallen, werden diese durch den eingebauten Innenring davon abgehalten.

Die für die Temperaturmessung eingesetzten Thermoelemente, werden um den Umfang des TMR verteilt, sind aber im Gegensatz zu Kapitel 4.1 nicht auf eine bestimmte Position am Umfang festgelegt.

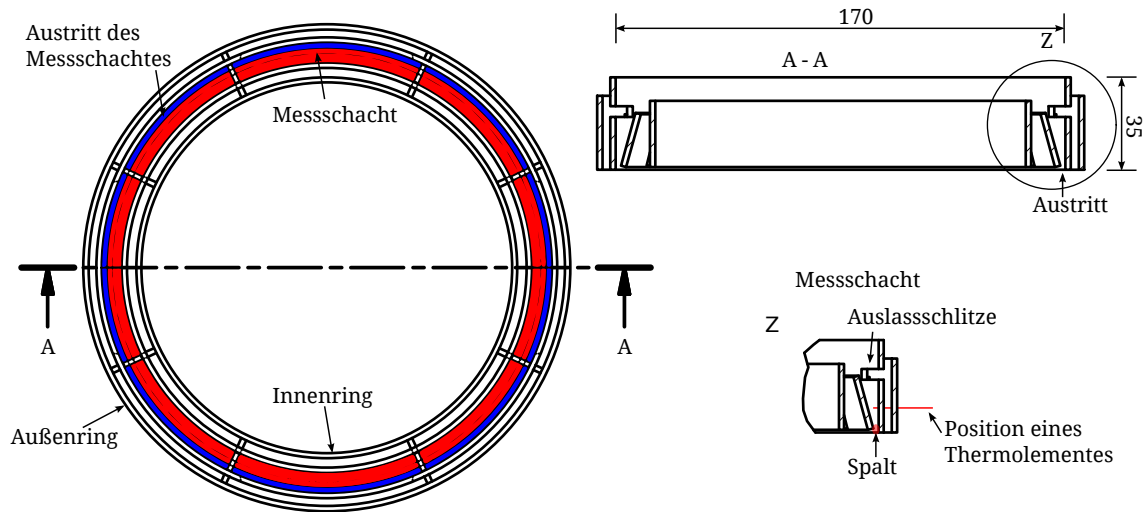


Abbildung 4.2: Aufbau des TMR mit Messschacht

4.2.2 Bewertung

Durch den um den ganzen Umfang laufenden Messschacht könnten Unregelmäßigkeiten im Partikelmassenstrom besser ausgeglichen werden, da sich die aufgestauten Partikel um einen großen Teil des Umfangs verteilen können. Somit könnte ein temporäres lokales Verstopfen des Messschachtes ausgeglichen werden.

Jedoch ist der dieses Konzeptes sehr aufwendig in der Fertigung und besteht aus vielen Komponenten. Auch ist dieses Konzept durch die nötige Dimensionierung des Spaltes abhängig von den Versuchsergebnissen, des in 4.1 beschriebenen Konzeptes.

4.3 TMR mit Schaber

4.3.1 Funktionsweise

Ein Konzept, das nicht auf einem verzögerten Partikelfluss aufbaut, wird in Abbildung 4.3 vorgestellt. Die Messkammern haben eine prismatische Form und sind an der Unterseite geschlossen. Der Auslass der Messkammern ist radial an der Wand des Messringes angeordnet, sodass durch die Zentrifugalkraft des rotierenden Receivers die Partikel nach außen transportiert werden. Dort treffen sie auf den balkenförmigen Abschluss des Auslasses. Die Rotationsgeschwindigkeit des Receivers bleibt während des Betriebes konstant, weshalb nicht davon auszugehen ist, dass Kräfte in Umfangsrichtung auf die

Partikel wirken, sondern nur die Zentrifugalkraft, die radial nach außen wirkt. Darum sollten sich die Partikel nur gegen den geschlossenen Abschluss des Austritts und nicht in Richtung der offenen Seiten bewegen, wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist. Die Partikel fließen deshalb nicht ab und die Messkammern werden vom Auslass ausgehend gefüllt. Durch die Schabervorrichtung, die in Abbildung 4.3 dargestellt ist, wird ein Teil der Partikel periodisch zur einen Seite des offenen Auslasses herausgeschoben. Die Höhe H der Schaberkante und damit die Menge der herausgeschobenen Partikel soll je nach Massenstrom eingestellt werden.

Die Spitze der Thermoelemente zur Messung der Partikeltemperatur befindet sich jeweils im Zentrum der prismatischen Messkammer.

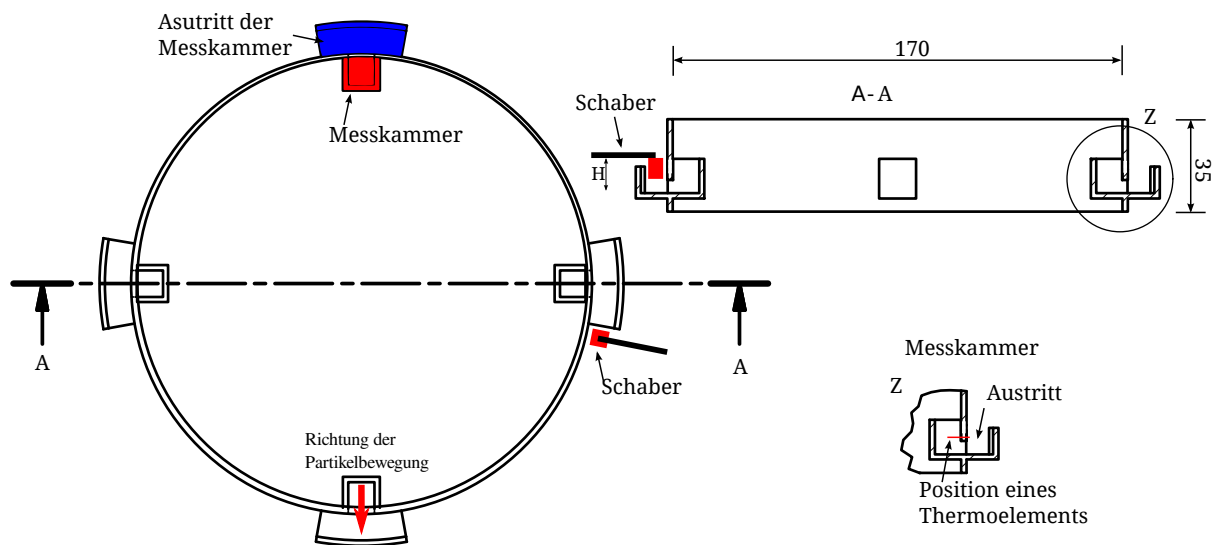


Abbildung 4.3: Aufbau des TMR mit Schaber

4.3.2 Bewertung

Das Schaberkonzept setzt im Gegensatz zu den in 4.1 und 4.2 aufgezeigten Konzepten nicht auf das Prinzip des verzögerten Partikelflusses und stellt daher eine Alternative dar, um Probleme bezüglich der Größe der Auslassöffnung der Messkammern aus den vorherigen Konzepten zu umgehen. Gleichzeitig ist es ein sehr flexibles Konzept. Durch die Möglichkeit, die Tiefe des Abschabens der Partikel am offenen Teil des Auslasses einstellen zu können, kann auf verschiedene Partikelmassenströme reagiert werden.

Eine Schwierigkeit dieses Konzeptes liegt wiederum in der Fertigung. Diese ist aufgrund

der hohen Genauigkeit, mit der der Schaber gefertigt und positioniert werden muss, sehr aufwendig. Es muss auf jeden Fall verhindert werden, dass sich rotierender TMR und statischer Schaber berühren und es somit zur einer Kollision kommt.

4.4 TMR mit außen liegenden Messkammern

4.4.1 Funktionsweise

Um die Wirkung der Zentrifugalkraft für die Füllung der Messkammern besser nutzen zu können, wurde ein Messkonzept mit außen liegenden Messkammern entwickelt, dass in Abbildung 4.4 zu sehen ist. Hierfür wurden zwei Varianten der Messkammernform betrachtet. Bei Variante 1 ist der Auslass parallel zur TMR-Achse nach unten gerichtet, bei der Variante 2 liegt der Austritt in der selben Achse, wie die Messkammer. Aus Fertigungsgründen haben die Messkammern eine zylindrische Form. Durch die Zentrifugalkraft werden die Partikel in die Messkammern gedrückt. Aufgrund des verjüngten Querschnittes am Auslass, werden die Partikel in der Messkammer aufgestaut und verzögert abgeführt. Dies entspricht dem selben Prinzip, wie es bei den senkrechten Messkammern in Kapitel 4.1 angewendet wird. Sobald die Messkammern voll sind, können die nachfolgenden Partikel über die Kammern hinweg ablaufen.

Die Thermoelemente werden bei diesem Konzept durch die Wand der Messkammern in deren Inneres geführt, wie in Abbildung 4.4 gezeigt ist.

4.4.2 Bewertung

Dieses Konzept ist eine Weiterentwicklung des in 4.1 beschriebenen TMR mit horizontalen Messkammern. Ein Vorteil an diesem Konzept liegt in der oben erwähnten Ausnutzung der Zentrifugalkraft zur Befüllung der Messkammern.

Nachteilig wirkt sich bei diesem Konzept wiederum ein erhöhter Fertigungsaufwand aus, der durch die außen liegenden Messkammern entsteht. Dieser ist allerdings nicht so hoch wie bei 4.2 einzuschätzen.

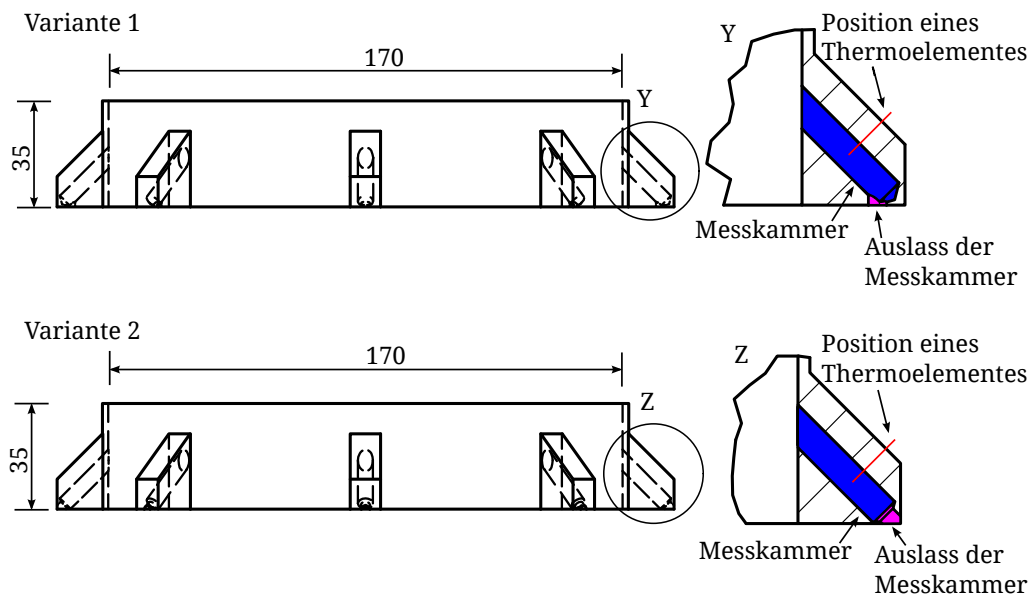


Abbildung 4.4: Aufbau des TMR mit außen liegenden Messkammern

4.5 Drehbehälter

Die oben beschriebenen Konzepte für die Bestimmung der Partikelauflasttemperatur sind alle Teil des rotierenden Receivers. Das folgende Konzept zeigt eine Variante, die unterhalb des rotierenden Systems liegt.

4.5.1 Funktionsweise

Die Messvorrichtung zur Bestimmung der Partikeltemperatur besteht bei diesem Konzept aus mehreren Behältern, die sich unterhalb des Receivers befinden. Jeder Behälter ist mit einem Getriebemotor verbunden, der am Rahmen des Receivers befestigt wird. Mithilfe der Getriebemotoren können sich die einzelnen Behälter um die vorgegebene Achse drehen. Dadurch ist es möglich einen kleinen Teil des Partikelmassenstroms in den Behältern aufzunehmen und nach der Drehung der Behälteröffnung nach unten, die aufgenommenen Partikel wieder abzugeben. Das Thermoelement für die Temperaturmessung wird durch die Achse, die Behälter und Getriebemotor verbindet in den Behälter geführt.

Die Temperatur der Partikel wird bei diesem Konzept zyklisch gemessen, wobei sich der Zyklus durch die Drehgeschwindigkeit des Behälters bestimmt. Diese wiederum wird durch den Partikelmassenstrom bestimmt, da sich der Behälter bei jeder Umdrehung

komplett füllen muss, um eine korrekte Messung der Temperatur zu erreichen. Mit der Regelung der Drehgeschwindigkeit der Behälter kann dieses Konzept an unterschiedliche Massenströme angepasst werden.

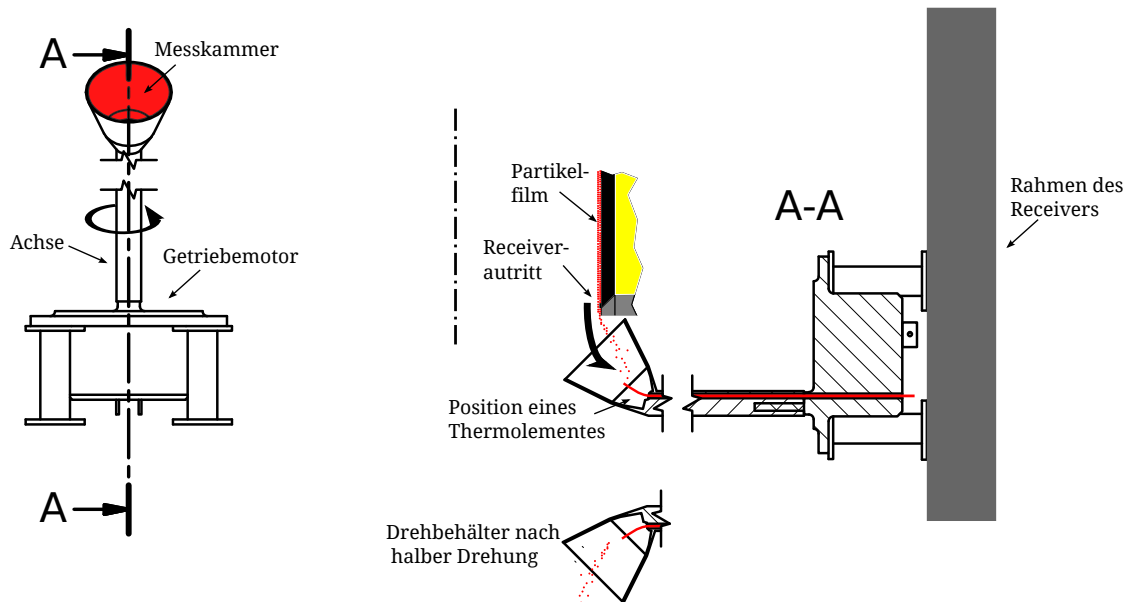


Abbildung 4.5: Aufbau der Drehbehälter

4.5.2 Bewertung

Das Drehbehälter-Konzept stellt einen neuen Ansatz dar, bei dem der Austausch der Partikel hierbei periodisch erfolgt. Der Aufwand für Versuche, um die Funktionalität des Konzeptes zu testen, wäre hierfür gering einzuschätzen, da nur die komplette Füllung der Behälter sichergestellt werden müsste. Fertigungstechnisch ist kein großer Aufwand zu erwarten, da es sich bei den Motoren, um Fertigteile handelt und an die Genauigkeit der Behälter keine hohe Genauigkeit gestellt werden muss.

4.6 Verzögerungsring

4.6.1 Funktionsweise

Ein weiteres Konzept, bei dem die Temperaturmessung nicht direkt am rotierenden Receiver stattfindet, sondern in einer statischen Messeinrichtung, ist der Verzögerungsring, vgl. Abbildung 4.6. Dieser besteht aus zwei Teilen. Der eine Teil ist ein rotierender Ring, der mit Bohrungen versehen ist durch die die Partikel aufgrund der Zentrifugalkraft nach außen befördert werden. Der andere Teil stellt einen nach außen gewölbten, statischen Ring dar, in dem die Partikel aufgefangen werden. Die Form dieses Ringes muss nun so gewählt werden, dass die aufgefangenen Partikel in der Wölbung kurze Zeit liegen bleiben und sie durch die nachfolgenden Partikel zum Auslassen gedrückt werden. Die Temperaturmessung der Partikel findet innerhalb der Wölbung statt, in der die Partikel angestaut werden sollen und so das benötigte Partikelvolumen von 3–5 Partikelschichten um die Thermoelemente erreicht wird.

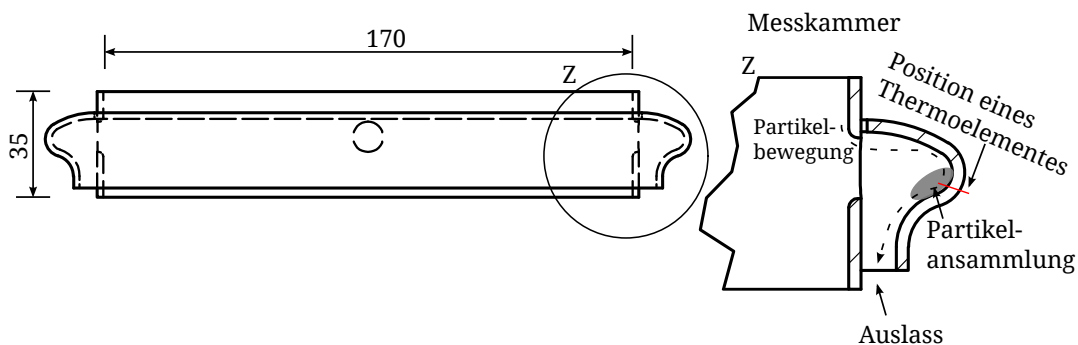


Abbildung 4.6: Aufbau des Verzögerungsringes

4.6.2 Bewertung

Der Verzögerungsring ist ein sehr komplexes Konzept. Zum Einen kann die Charakterisierung der genauen Form der Wölbung und die damit verbunden Versuchen sehr aufwändig sein. Zum Anderen ist die Fertigung von solch einem Verzögerungsring, der eine Freiformgeometrie besitzt, äußerst zeit -und kostenintensiv.

4.7 Überblick und Auswahl

	Konzept	Messung	Messprinzip	Fertigung	Funktionstest
1	horizontale Messkammern	kontinuierlich dynamisch	verzögerter Massenstrom	mittlerer Aufwand	mittlerer Aufwand
2	Messschacht	kontinuierlich dynamisch	verzögerter Massenstrom	hoher Aufwand	mittlerer Aufwand
3	Schaber	periodisch dynamisch	aufstauen und abschaben	hoher Aufwand	hoher Aufwand
4	außen liegende Messkammern	kontinuierlich dynamisch	verzögerter Massenstrom	mittlerer Aufwand	mittlerer Aufwand
5	Drehbehälter	periodisch statisch	auffüllen und entleeren	geringer Aufwand	geringer Aufwand
6	Verzögerungsring	kontinuierlich statisch	verzögerter Massenstrom	hoher Aufwand	hoher Aufwand

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der verschiedenen Konzepte

In Tab. 4.1 sind alle vorgestellten Konzepte noch einmal zusammengefasst. Die verwendeten Bewertungen geringer, mittlerer und hoher Aufwand sollen keine absoluten und quantitativen Werte darstellen. Sie sollen als qualitative Bewertung dienen, um die unterschiedlichen Konzepte in Relation zueinander zu setzen.

Für die Konzepte 1 – 4 erhält man aufgrund des dynamischen Messprinzips eine Umfangsverteilung der Partikeltemperatur am Receiver, d.h. die gemessenen Temperaturen beschreiben die Temperaturen der Partikel in diesen Stellen des Receiverumfangs. Kon-

zepte 5 und 6 basieren auf dem statischen Prinzip und man erhält dadurch nur eine Partikelmischtemperatur, d.h. es gibt keinen Zusammenhang zwischen den Umfangspositionen des Receivers und denen des Temperaturmesssystems. Um die gemessenen Daten für die Validierung von Simulationsmodellen verwenden zu können, wird allerdings die Umfangsverteilung der Partikeltemperatur benötigt, da sonst Temperaturschwankungen in der Partikelschicht nicht erfasst werden können. Darum werden im Folgenden auch nur noch die Konzepte 1 – 4 betrachtet, die eine Umfangsverteilung der Partikeltemperatur ermitteln können.

Aus diesen vier Konzepten wurde zunächst Konzept 1 für die ersten Funktionstests gewählt, da für dieses der geringste Aufwand für die Versuche zu erwarten war und gleichzeitig die optische Zugänglichkeit, also wie gut das Verhalten der Partikel in der Messapparatur zu beobachten ist, am größten war. Konzept 2 und 3 wurden zunächst wegen des erhöhten Fertigungsaufwandes zurückgestellt, Konzept 4 wegen der schwierigeren Beobachtbarkeit der Partikel im Messsystem.

Kapitel 5

Funktionstests

Um das Verhalten und die Bewegung der Partikel im laufenden Receiver für die ausgewählten Konzepte untersuchen zu können, wurden Funktionstests ohne thermische Bestrahlung, durchgeführt. Bei diesen kam eine Hochgeschwindigkeits-Kamera zum Einsatz, mit der die Partikelbewegung gut analysiert werden konnte. Für die ersten Partikeltests mit dem Konzept des TMR und senkrechten Messkammern wurde ein Rapid-Prototyping-Modell aus Gips angefertigt. Dieser beinhaltet acht Messkammern in unterschiedlichen und annähernd rechteckigen Auslassquerschnitten, die in Tabelle 5.1 aufgeführt sind. Bei diesen qualitativen Funktionstests standen zunächst die Identifizierung des richtigen Austrittsquerschnittes und die Beobachtung der Partikel im TMR im Vordergrund.

Die Versuche wurden für zwei relevante Receiverneigungen durchgeführt: 45° und 90° , bei der die Apertur nach unten schaut. Als Standardparameter für die Versuche wurde eine Drehzahl von ungefähr 150 U/min und ein Massenstrom von 12 g/s gewählt. Leichte Schwankungen dieser beiden Parameter konnten nicht ausgeschlossen werden, da keine Regelung der Drehzahl und des Partikelmassenstromes für diese Versuche existierte.

Messkammer	1	2	3	4	5	6
Austrittsquerschnitt in mm^2	3×3	4×3	5×3	6×3	7×3	8×3

Tabelle 5.1: *Unterschiedliche Austrittsquerschnitt bei TMR*

5.1 Verzögerter Partikelmassenstrom

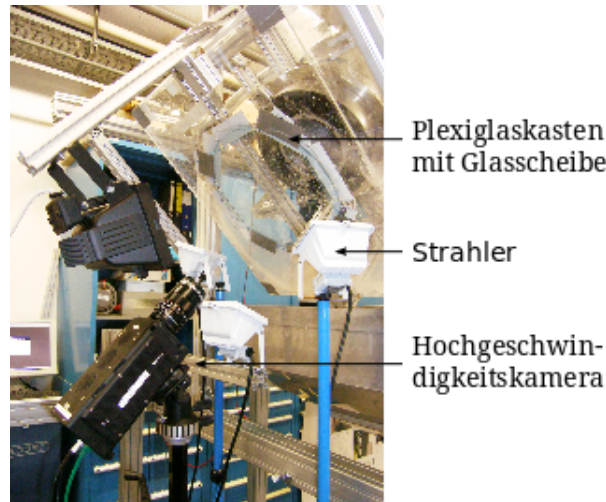


Abbildung 5.1: *Aufbau des Versuchsstandes*

Die Versuche wurden mit der angesprochenen Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt, und so unter dem Receiver positioniert, dass ein guter optischer Zugang an die wichtigen Stellen im Receiver gewährleistet war. Dadurch konnten die Versuchsergebnisse gut visualisiert werden. Für die nötige Belichtung im und am Receiver wurden Strahler um die Kamera herum installiert. Das verwendete Rapid-Prototyping-Modell wurde mit Klemmen an den unteren Haltering des Inliners befestigt. Um dieses mit der Hochgeschwindigkeitskamera gut beobachten zu können, wurde der Sammelring weggelassen und anstatt diesem ein Kasten aus Plexiglas mit einer Glasscheibe in der Mitte unter dem Receiver positioniert, wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist.

Bei den ersten Versuchen kristallisierten sich die Messkammern 2, 3, 4 heraus, bei denen ein verzögerter Partikelmassenstrom erwartet werden konnte. Für diese drei Kammer konnte gezeigt werden, dass sie sich bei einigen Versuchen füllen, bei anderen die Partikel unverzüglich durchlaufen, so dass keine Füllung der Messkammern zu beobachten war. In Abbildung 5.2 kann man erkennen, dass Kammern 2 und 3 gefüllt sind, Kammer 4 gerade nicht gefüllt und Kammer 1 dauerhaft durch Partikel blockiert ist. Die Kammern 5, 6, 7 und 8 wurden bei fast allen Versuchen von Partikeln unverzüglich durchlaufen. Zu diesem Zeitpunkt der Versuche konnte noch keine Drosselung des Partikelflusses durch die Messkammern festgestellt werden.

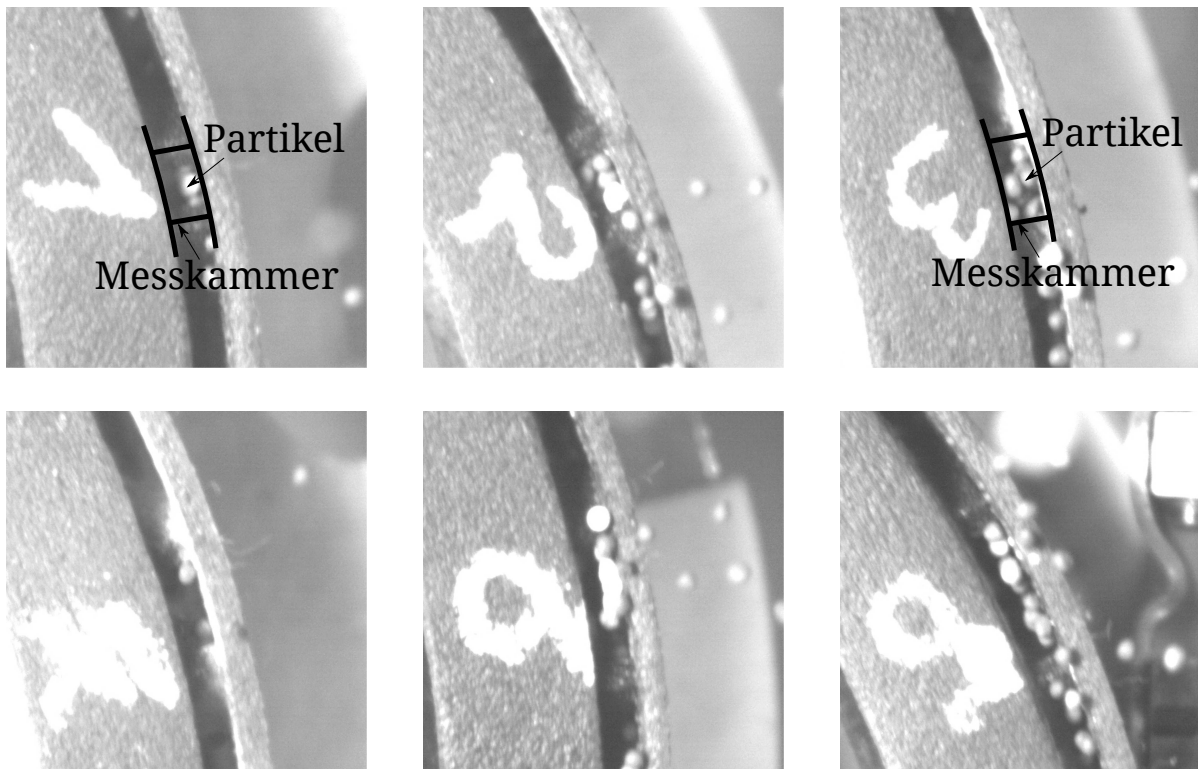


Abbildung 5.2: Befüllung der Messkammern

Im Verlauf der Versuche wurde allerdings deutlich, dass die Messkammern sehr empfindlich auf schwankende Massenströme reagieren. Durch Brückenbildung verstopfen die Austritte der Messkammern leicht und können dauerhaft blockiert bleiben, wie in Abbildung 5.3 zu erkennen ist. Dies wird besonders in Abbildung 5.4 deutlich. Darin ist sogar Messkammer 7 mit einem großen Austrittsquerschnitt durch Brückenbildung blockiert.

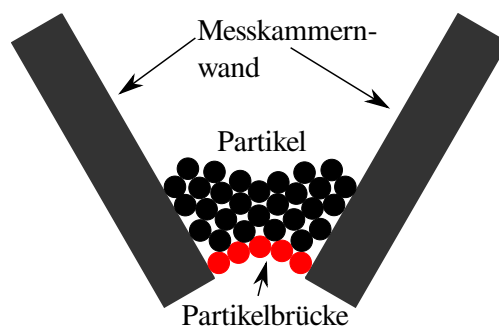


Abbildung 5.3: Brückenbildung bei Partikeln

Ein Verstopfen einer Messkammern, kann also auch bei großen Austrittsquerschnitten geschehen. Deswegen muss das Partikelverhalten in den Messkammern näher untersucht werden. Aber auch für die Bewertung des richtigen Austrittsquerschnitts ist das Verhalten der Partikel in der Messkammern sehr wichtig, da noch nicht ermittelt werden konnte, ob sich die drei ausgewählten Messkammer komplett mit Partikeln füllen oder nicht und ob ein verzögertes Abfließen der Partikel aus den Messkammern erkennbar ist.

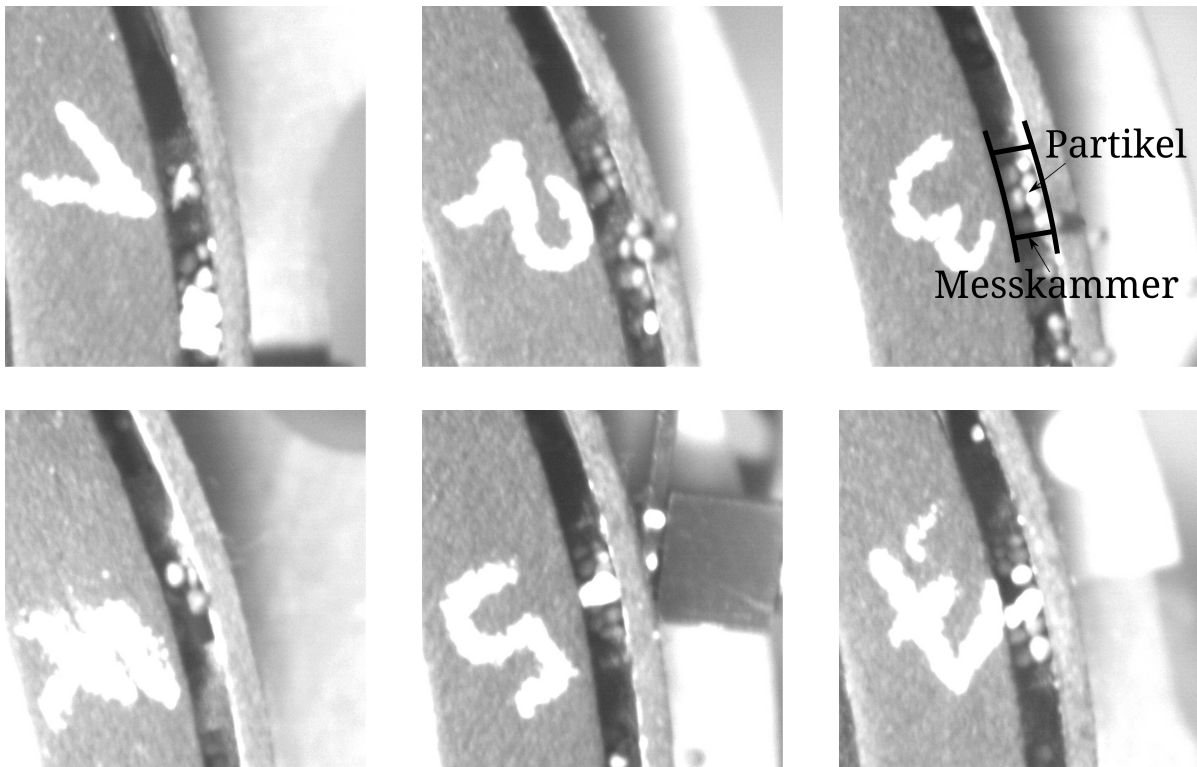


Abbildung 5.4: *Brückenbildung in Messkammern unabhängig von Austrittsquerschnitt*

Aus diesem Grund wurde im Receiver ein Spiegel installiert, mit dessen Hilfe man die Messkammern von oben beobachten konnte. In Abbildung 5.5 ist zu erkennen, dass sich Messkammern 1 und 2 füllen und über die gesamte Messzeit ohne Partikelbewegung gefüllt bleiben. Messkammer 3 ist leer und die Partikel laufen unverzüglich durch den Austritt wieder hinaus. Bei der Sicht des selben Versuches mit dem Fokus auf den Austritt der Messkammern, wie in Abbildung 5.6 zu sehen ist, bestätigt sich diese Beobachtung. Messkammer 1 und 2 sind mit Partikeln blockiert und es findet kein Partikelfluss

aus dem Austritt der Messkammern statt. Für Kammer 3 lässt sich wie bei der Sicht durch den Spiegel ein unverzögertes, freies Laufen der Partikel durch den Austritt der Messkammern feststellen. Ein solches Partikelverhalten konnte in mehreren Versuchen nachgewiesen werden.

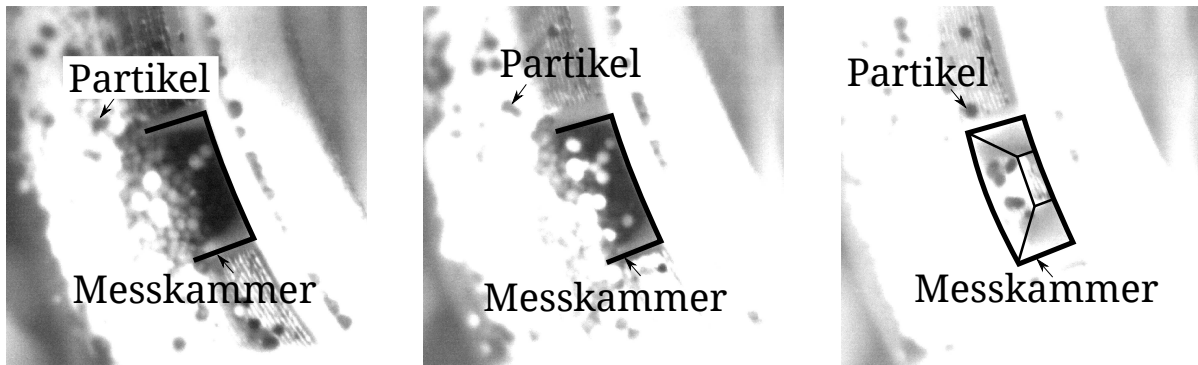


Abbildung 5.5: Sicht auf die Messkammern 1, 2 und 3 mithilfe eines Spiegels

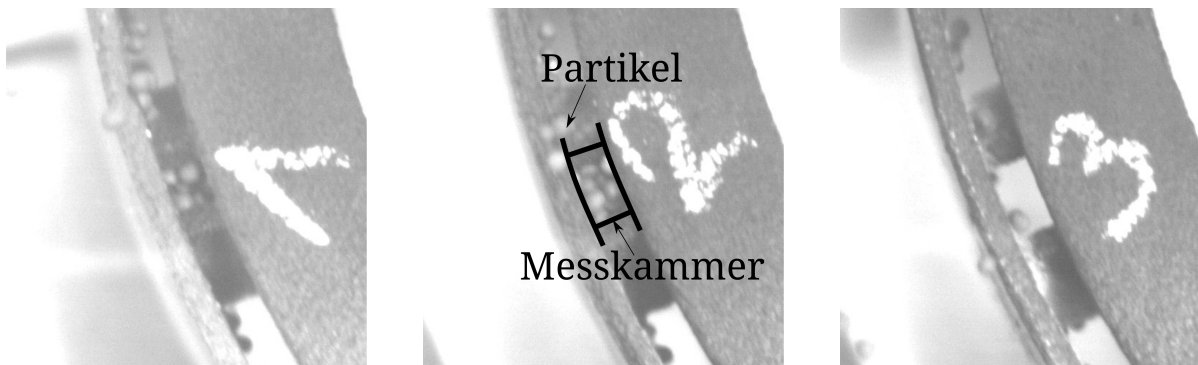


Abbildung 5.6: Sicht auf Messkammern 1, 2 und 3 von unten

Aus den Erkenntnissen der bisherigen Funktionstests lässt sich festhalten, dass ein spezieller Austrittsquerschnitt für einen verzögerten Partikelfluss durch die Messkammern des TMR nicht bestimmt werden konnte. Das Partikelverhalten lässt sich bedingt durch die Brückenbildung als zufällig beschreiben. Es konnte somit nur ein direktes Verstopfen der Messkammern oder der freie unverzögerte Durchfluss der Partikel durch die Messkammern ohne Anstauen in den Versuchen gezeigt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der TMR mit senkrechten Messkammern mit dem bisherigen Temperaturmessprinzip nicht weiter verfolgt.

5.2 Impulsstöße

Bislang wurde eine kontinuierlich-dynamische Temperaturmessung als Grundlage des TMR mit senkrechten Messkammern angewendet. Als Folge der Ergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen wurde nun eine periodisch-dynamische Temperaturmessung angestrebt. Diese sollte mit kurzen Impulsstößen auf den Receiver erfolgen. Dadurch sollte eine Entleerung der durch Brückenbildung blockierten Messkammern erfolgen, so dass neue Partikel diese befüllen können und ein Partikelaustausch in den Kammern stattfinden kann. Bei Vorversuchen konnte bei einem einzigen Impulsstoß keine Entleerung beobachtet werden. Für die nachfolgenden Versuche sind deshalb fünf kurze axiale Impulsstöße auf den Laufrollenring also Versuchsparameter ausgewählt worden.

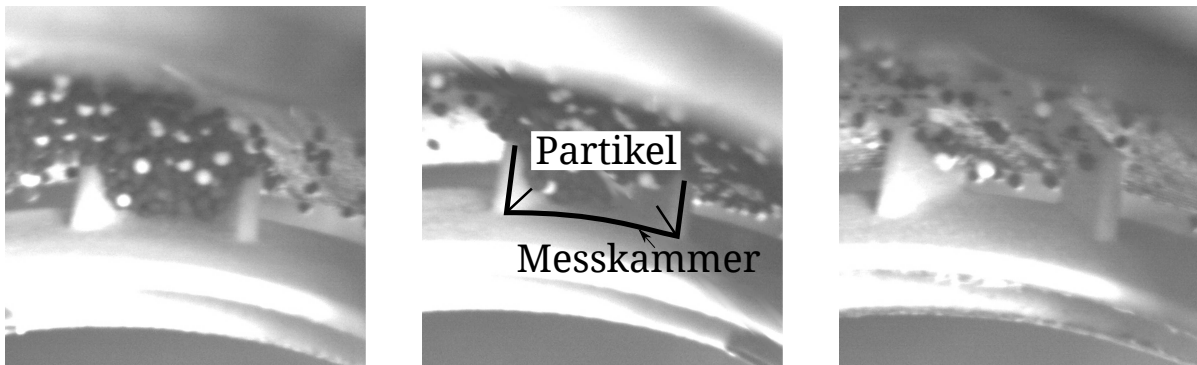


Abbildung 5.7: Partikelfüllung der Messkammern 2, 3 und 7 vor dem Impulsstoß



Abbildung 5.8: Partikelfüllung der Messkammern 2, 3 und 7 kurz nach dem Impulsstoß

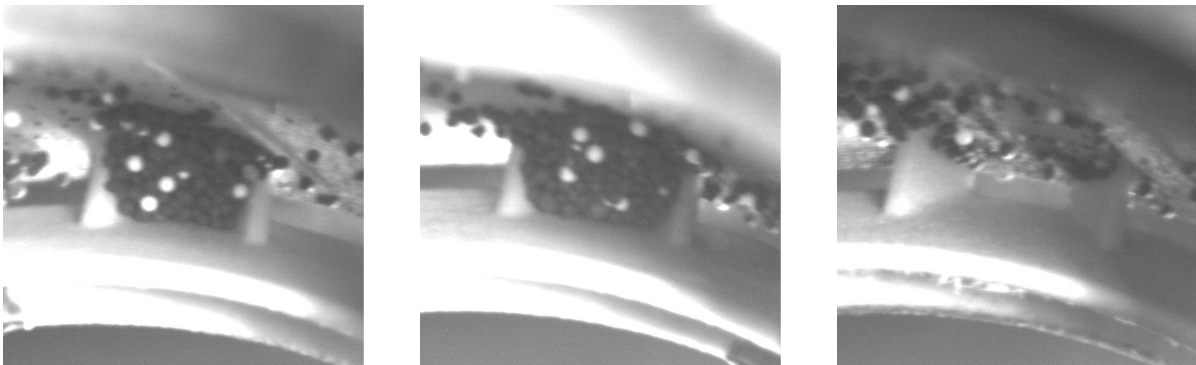


Abbildung 5.9: Partikelfüllung der Messkammern 2, 3 und 7 nach dem Impulsstoß

Abbildung 5.7 zeigt die gefüllten Messkammern vor den Impulsstößen, während Abbildung 5.8 die Kammern nach den Impulsstößen zeigt. Die Messkammern sind hier eindeutig entleert. In Abbildung 5.9 sind die Kammern dann wieder gefüllt. Bei weiteren Versuchen mit Partikelmassenströmen von 6 und 2 g/s konnten ebenfalls eine Entleerung durch fünf kurze Impulsstöße und die anschließende Wiederbefüllung der Kammern beobachtet werden.

Bei Versuchen mit 90° Receiverneigung traten jedoch Schwierigkeiten bei der Wiederbefüllung der Messkammern auf. Abbildung 5.11 zeigt einen Versuch bei Standardparametern. Die Messkammern können sich hier nicht mehr komplett füllen.

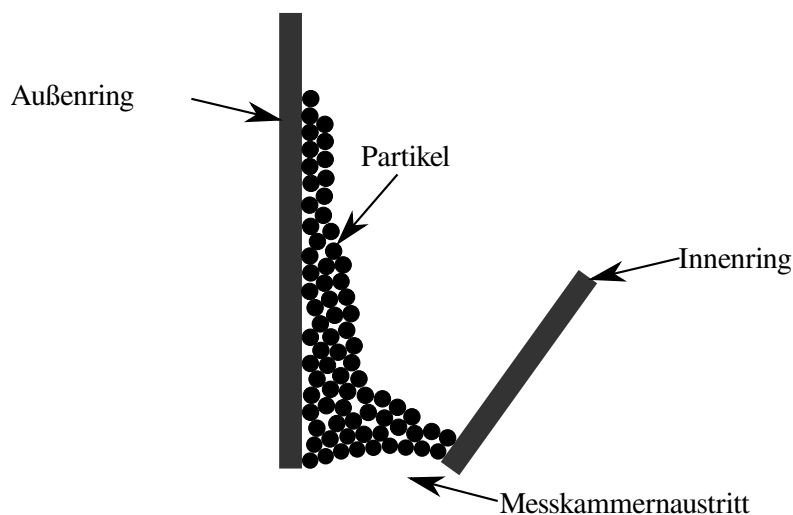


Abbildung 5.10: Füllung der Messkammern im TMR

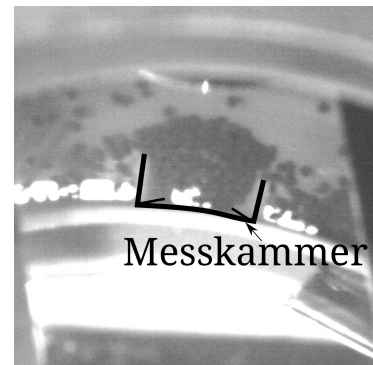
Vielmehr bildet sich eine dünne Partikelschicht an der Wand des TMR aus. Wie in Abbildung 5.5 zu erkennen ist, füllen sich die Messkammern nicht komplett mit Partikeln. Aufgrund der Zentrifugalkraft werden die Partikel nach außen gedrückt, sodass eine parabelförmige Befüllung der Messkammern die Folge ist (vgl. Abbildung 5.10).



Messkammer 2 vor Impulsstoß



Messkammer 3 vor Impulsstoß



Messkammer 2 nach Impulsstoß



Messkammer 3 nach Impulsstoß



Messkammer 2 füllt sich nicht



Messkammer 3 füllt sich nicht

Abbildung 5.11: *Partikelfüllung der Messkammern 2 und 3 vor und nach dem Impulsstoß*

Bei geringen Partikelmassenströmen hat dies zur Folge, dass die Messkammern kaum bis gar nicht befüllt werden und sich nur eine Schicht an der Wand des TMR anstaut. Ein solches Partikelverhalten ist in Abbildung 5.12 zu erkennen und erlaubt keine korrekte Temperaturmessung mit Thermoelementen, da das in Kapitel 3.1 beschriebene Kriterium für die Temperaturmessung mit Berührungsthermometern nicht erfüllt wäre.

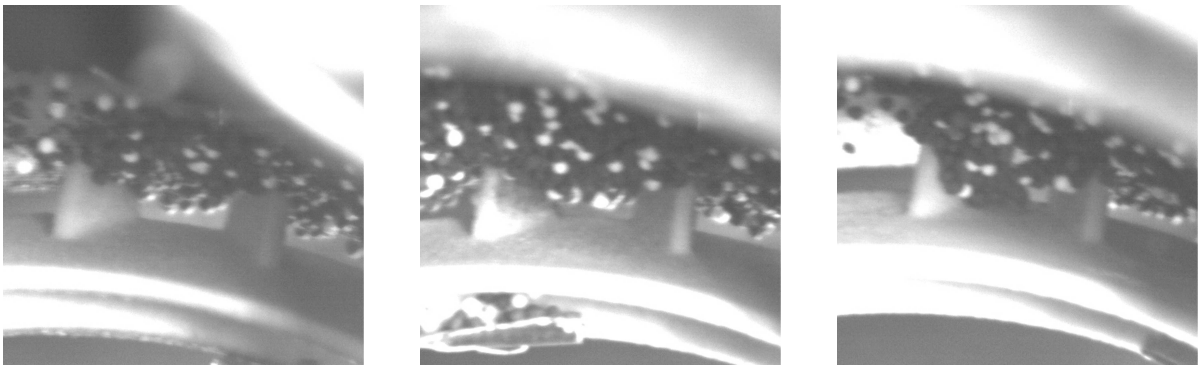


Abbildung 5.12: *Partikelfüllung der Messkammern 6, 5 und 3*

Ein weiteres Problem stellt auch die Position der Thermoelemente selbst dar, die in die Messkammern hineinragen, den Auslass nahe der Kammernwand zusätzlich versperren und sich Partikel darüber aufstauen können. Zusätzlich wird deutlich, dass die Partikel ein stark zufälliges Verhalten besitzen. Zu Anfang eines Versuchs waren die Kammern immer gefüllt, wie beispielsweise in Abbildung 5.11 zu sehen ist. Dies steht im Widerspruch dazu, dass das sich die Messkammern nach der Entleerung nicht mehr füllen, lässt sich jedoch mit dem erhöhten Partikelmassenstrom bei Schichtaufbau erklären.

Unter diesen Bedingungen war eine weitere Verfolgung dieses Ansatzes, einen Partikelaustausch durch Impulsstöße auf den Receiver zu erzwingen, nicht sinnvoll und wurde daraufhin in der bisher durchgeführten Form eingestellt. Folglich wurden auch die Konzepte des TMR mit Messschacht und des Schabers nicht weiter verfolgt, da die vollständige Füllung des Schachtes oder der Kammern nicht gewährleistet war. Als logische Konsequenz blieb nur das Konzept mit außenliegenden Messkammern, die im Nachfolgenden ebenfalls untersucht wurden.

5.3 Außen liegende Messkammern

Das Konzept der außen liegenden Messkammern wurde in Kapitel 4.1 wegen der schwierigen optischen Zugänglichkeit der Kammern zunächst zurückgestellt. Um die Probleme der Beobachtbarkeit der Partikel in den Kammern zu lösen, wurde eine Kammer aus Plexiglas angefertigt. Damit konnte das existierende Rapid-Prototyping-Modell so modifiziert werden, dass das Konzept der außen liegenden Messkammern daran getestet werden konnte. Auch bei diesen Versuchen wurden wieder Impulsstöße eingesetzt, um die Messkammern zu entleeren.



Abbildung 5.13: *Messkammern vor, bei und nach den Impulsstößen*

Die in Kapitel 4.4 beschriebene Varianten mit parallel zur TMR-Achse nach unten gerichtetem Auslass der Messkammern wurde als Erstes getestet. Abbildung 5.13 zeigt die gefüllte Messkammer vor, bei und nach den Implulsstößen. Bei den vollständig gefüllten Messkammern, wären die Thermoelemente ausreichend von Partikeln umgeben gewesen und es hätte nach Kapitel 3.1 eine korrekte Messung durchgeführt werden können. Jedoch wird deutlich, dass eine Entleerung der Messkammern nicht stattfindet. Die Partikelbrücke, die sich am Austritt der Messkammern gebildet hat, ist vermutlich so hoch, dass diese eine Entleerung der Kammern verhindert.

In einer zweiten Variante wurde der Partikelaustritt entlang der Achse der Messkammer angebracht. Doch auch bei diesem Versuch ergab sich nach dem Füllen der Messkammer keine Entleerung nach den Impulsstößen, was in Abbildung 5.14 zu sehen ist. Als Grund wird auch hier angenommen, dass die Partikel durch die Zentrifugalkraft eine solch starke Brücke gebildet haben, dass diese durch die angewendeten Impulsstöße nicht wieder

gelöst werden konnte. Ein weiterer Grund wäre ein zu kleiner Auslass. In diesem Fall hätte eine Vergrößerung des Auslasses aber eine Befüllung der Messkammern verhindern können. Hierzu wurden verschiedene Versuche durchgeführt, die dies auch bestätigt haben.



Abbildung 5.14: *Messkammern vor, bei und nach den Impulsstößen*

Bei den beschriebenen Versuchen hat sich gezeigt, dass die Füllung von außen liegenden Messkammern einen deutlichen Vorteil gegenüber der Füllung von horizontalen Messkammern hat, da hier keine parabelförmigen und damit unvollständig gefüllten Kammern entstehen können. Es ist aber nicht gelungen ein periodisches Füllen und Entleeren der montierten Messkammer zu erreichen. Darum wurde basierend auf dem Konzept der außenliegenden Messkammern ein neues Messkonzept für die Bestimmung der Partikelaustrittstemperaturen entwickelt.

Kapitel 6

TMR mit automatisiertem Schließring

Dieses neu entwickelte Konzept ist dem Aufbau des TMR mit außen liegenden Messkammern sehr ähnlich, da die Wirkung der Zentrifugalkraft zur Füllung der Messkammern genutzt werden soll. Das technisch aufwändige Konzept für die Messung der Partikeltemperatur beinhaltet eine Mechanik zur Steuerung des Auslasses des am TMR außen angelagerten Messkammern. Dieses Konzept wird nun im Folgenden detailliert erläutert.

6.1 Funktionsweise

Um den Abfluss der Partikel gezielt steuern zu können, wurde eine Mechanik entwickelt, mit der man den Auslass schließen und öffnen kann. Die Mechanik besteht aus einem am Receiver angebrachten, rotierenden und einem separaten, statischen Teil.

Wie in Abbildung 6.1 zu sehen ist, zeigen die Messkammern radial nach außen und sind nach unten hin offen. Sie können jedoch durch einen Verschlussring, der in Abbildung 6.2 dargestellt ist, verschlossen werden. Dieser Verschlussring ist an drei zylindrischen Stangen befestigt, welche wiederum in jeweils zwei Bohrungen durch den Flansch und den Laufring des Receivers axial geführt sind. Den Abschluss des rotierenden Teils der Mechanik bildet ein Rollring, in dem die drei Stangen durch Gewinde befestigt sind und das Bindeglied zwischen rotierendem und statischem System darstellt.

Durch eine Krafteinleitung auf den Rollring in axialer Richtung bewegt sich der rotierende Teil der Mechanik in Richtung der Krafteinleitung nach unten. Damit entsteht ein Abstand zwischen TMR und Verschlussring und die Messkammern stehen offen. Durch

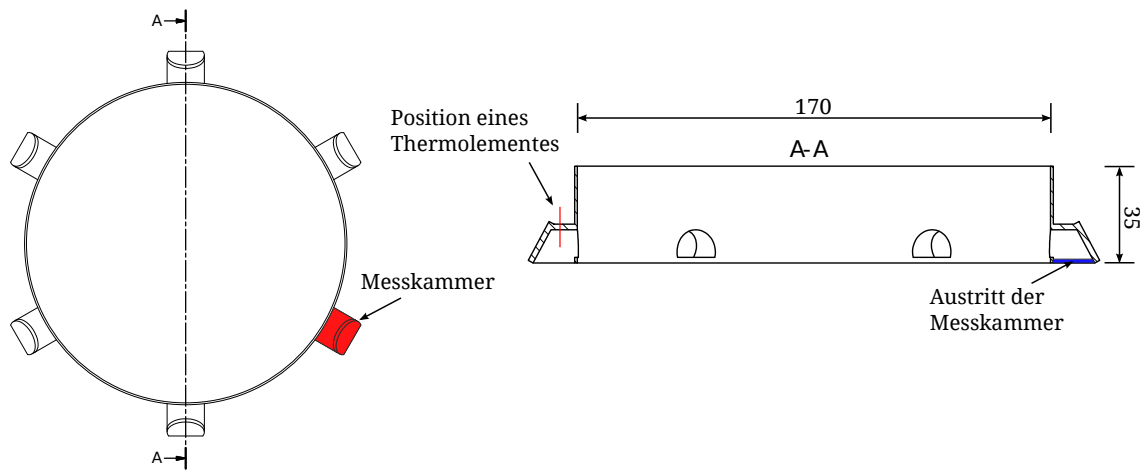


Abbildung 6.1: Aufbau des TMR

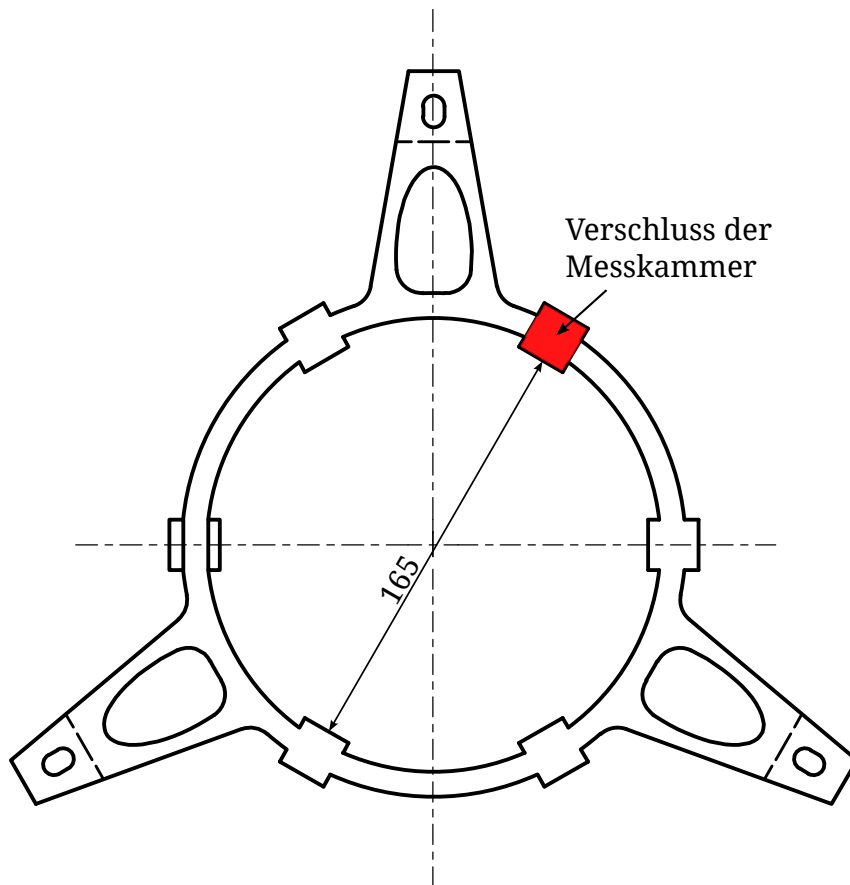


Abbildung 6.2: Aufbau des des Verschlussringes

Schraubenfedern die eine rückstellende Kraft entgegen der Krafteinleitung bereitstellen, kann der rotierende Teil der Mechanik in seine Ruheposition gebracht werden, in der die Messkammern geschlossen sind. Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 6.3 zu sehen.

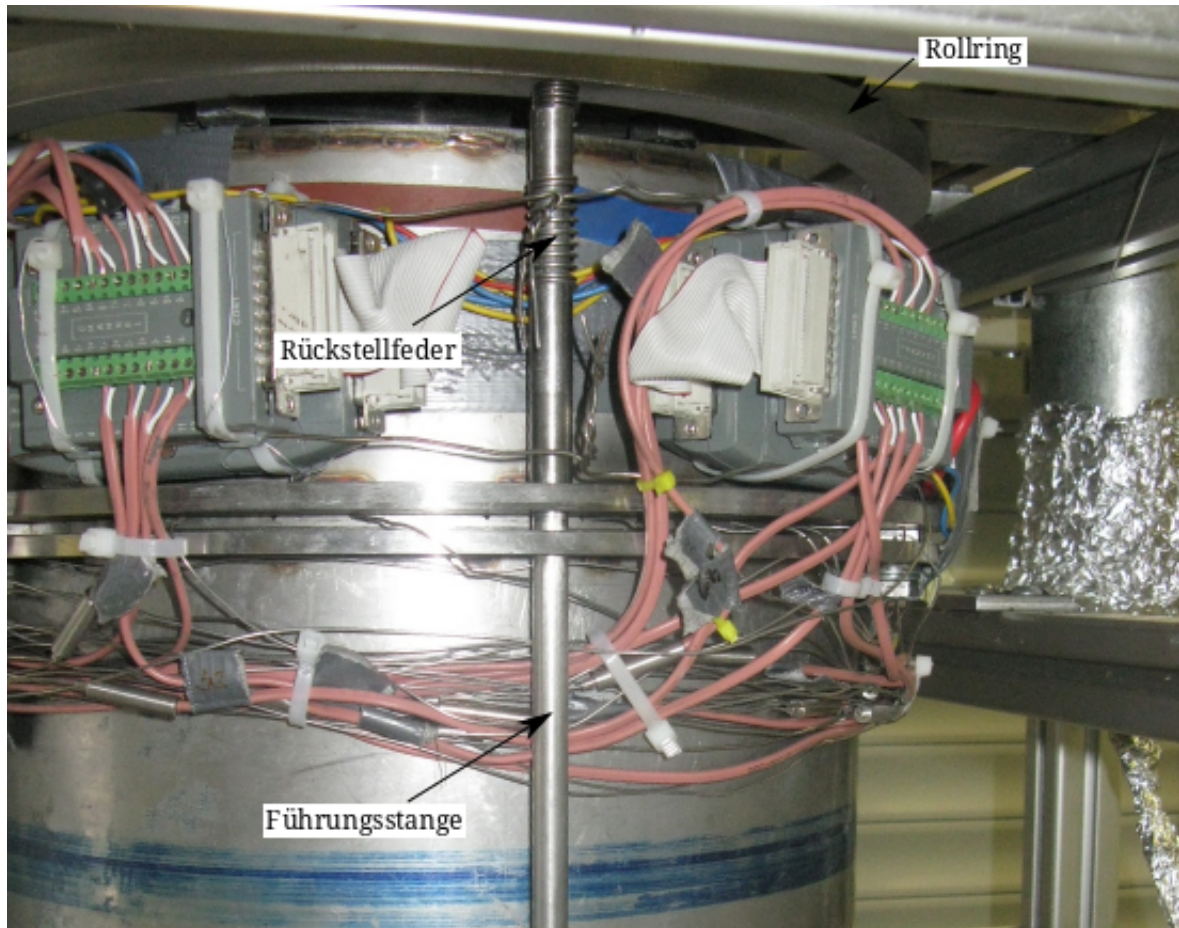


Abbildung 6.3: Laufring, Führungsstangen und Rückstellfedern im rotierenden System am Receiver

Den wichtigsten Teil des statischen Systems bilden drei Pneumatik-Kolben, die für die oben beschriebene Krafteinleitung sorgen. Diese Kolben sind so angebracht sind, dass deren Arbeitsrichtung parallel zur Längsachse der Stangen verläuft. An den Enden der Kolbenstangen angebrachte Gummirollen, auf denen der Laufring abrollt, sorgen für die Verbindung zwischen statischem und rotierendem Teil des Messsystems.

In Abbildung 6.4 ist das Prinzip und die Funktionsweise des automatisierten Schließrings dargestellt, die Kolben sind in Abbildung 6.5 zu sehen.

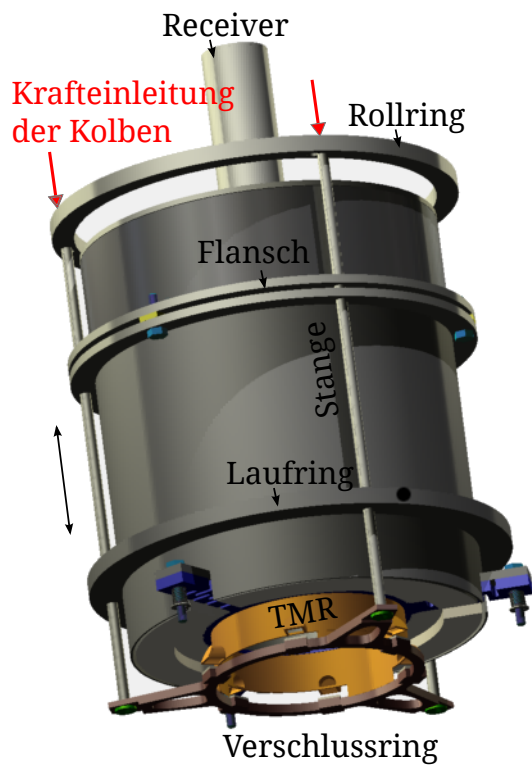


Abbildung 6.4: Prinzip des Messsystems

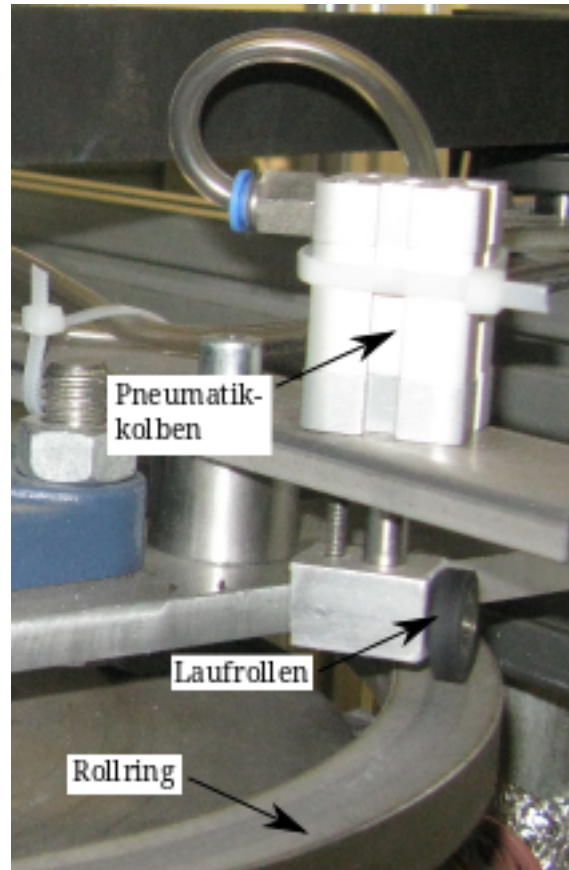


Abbildung 6.5: Pneumatik-Kolben des statischen Systems

6.2 Automatisierung

Um eine automatisch funktionierende, zeitdiskrete Entleerung der Messkammern zu realisieren, wurde eine Automatisierungskette entwickelt, die in Abbildung 6.6 verdeutlicht ist. Als Eingangsdaten müssen die Periode zwischen zwei Entleerungen und die Dauer der Entleerung eingegeben werden. Diese Eingabe erfolgt über ein LabView-Programm, das ein 5V-Signal über einen COM-Anschluss an einen analogen Spannungsgeber weitergibt. Das ausgegebene Spannungssignal schaltet ein Relais, welches wiederum die

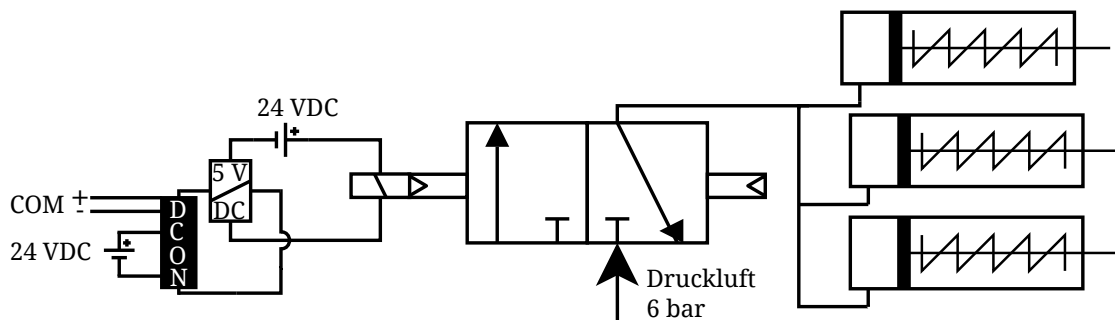


Abbildung 6.6: Schaltbild der Automatisierung des Temperatur-Messsystems

Stromversorgung für das elektrisch gesteuerte Pneumatik-Ventil schaltet. Über dieses werden die Pneumatikkolben des statischen Systems mit Druckluft versorgt. Der TMR ist bei Schaltung des 5V-Signales geschlossen und wird bei 0V automatisch geöffnet. Im Anhang sind die Betriebsdaten der verschiedenen Komponenten der Automatisierung dargestellt.

6.3 Temperaturmessung

Nach der erfolgreichen Fertigung und Montage der Komponenten des Messsystems, wurden mehrere Funktionstests durchgeführt. Zunächst wurde die Mechanik am rotierenden Teil des Systems getestet. Der Laufring und die Führungsstangen wurden wie vorgesehen von den Pneumatikkolben nach unten gedrückt und nach Entleerung des pneumatischen Systems durch die eingebauten Federn in ihre Ausgangsstellung zurück gedrückt. Im Weiteren wurde der Verschlussring auf seine Lage hin überprüft und ob dieser die Messkammern korrekt verschließt. Dies konnte, nachdem der Messring in seiner Position nachjustiert worden ist, auch beobachtet werden. Als Letztes wurde die Automatisierung auf ihre Funktionalität hin geprüft, welche ebenfalls sichergestellt werden konnte. Nach diesen positiven Funktionstests, wurde das Messsystem mithilfe von Hochleistungsstrahlern im Sonnenofen am DLR Standort Köln getestet.

Im Rahmen einer Messkampagne, bei der der Wirkungsgrad des Zentrifugalreceivers bestimmt werden sollte, wurde gleichzeitig die Funktionalität des entwickelten Tempe-

raturmesssystems getestet. Dabei wurde der Receiver mit Hochleistungsstrahlern bestrahlt, die insgesamt eine maximale Eingangsleistung von 7 kW erzielen konnten. Der Versuchsaufbau wird an dieser Stelle nicht näher beschrieben, da sie nicht Fokus der vorliegenden Arbeit darstellt.

Die Funktionalität des Messsystems wird im Folgenden anhand von zwei Versuchen beispielhaft demonstriert. Der erste Versuch wurde mit einem hohen Massenstrom von 10 g/s und der zweite mit einem mittleren Massenstrom von 5 g/s durchgeführt. Die Receiverneigung von 90° und die Eingangsleistung von 1548 W blieben jeweils in beiden Versuchen konstant.

Da in der Anfangsphase eines Versuchs mit eingehender Wärmestrahlung die Temperaturverläufe aufgrund der hohen Wärmekapazität des Receivers und der daraus bedingten Aufheizphase aller Receiverkomponenten sehr instationär waren, wurde mit dem Test des TMR erst im annähernd stationären Temperaturbereich begonnen.

6.3.1 Massenstrom: 10 g/s

In Abbildung 6.7 sind die Temperaturverläufe der sechs Thermoelemente (TE) in den Messkammern zu sehen. Zu Beginn des Diagramms sieht man die Temperatur der Partikel, die sich bereits seit dem Anfahren des Receivers in den Kammern befanden. Diese waren schon abgekühlt und somit nicht repräsentativ für die Temperatur der Partikel am Receiveraustritt.

Die Entleerung und Wiederbefüllung der Messkammern ist in Abbildung 6.7 gut zu erkennen. Das Signal des LabView Programms, im Diagramm als TMR_Control bezeichnet, öffnet die Kammern für eine Sekunde, und danach direkt wieder geschlossen. Die Messkammern konnten sich jetzt wieder mit neuen aufgeheizten Partikeln aus dem Receiver füllen. Es war sofort ein sprunghaften Anstieg der Temperatur in den Kammern zu beobachten. Nach dem die Maximaltemperatur erreicht war, fiel die Temperatur in den Messkammern wieder langsam ab. Daraus kann man schließen, dass sich die Messkammern sehr schnell mit Partikel füllen und dass die gemessene Maximaltemperatur der Temperatur der gerade in die Messkammern gelaufenen Partikel entspricht. Danach

stellt sich ein Abkühlvorgang der Partikel ein, wodurch der Temperaturabfall nach dem Maximum zu erklären ist.

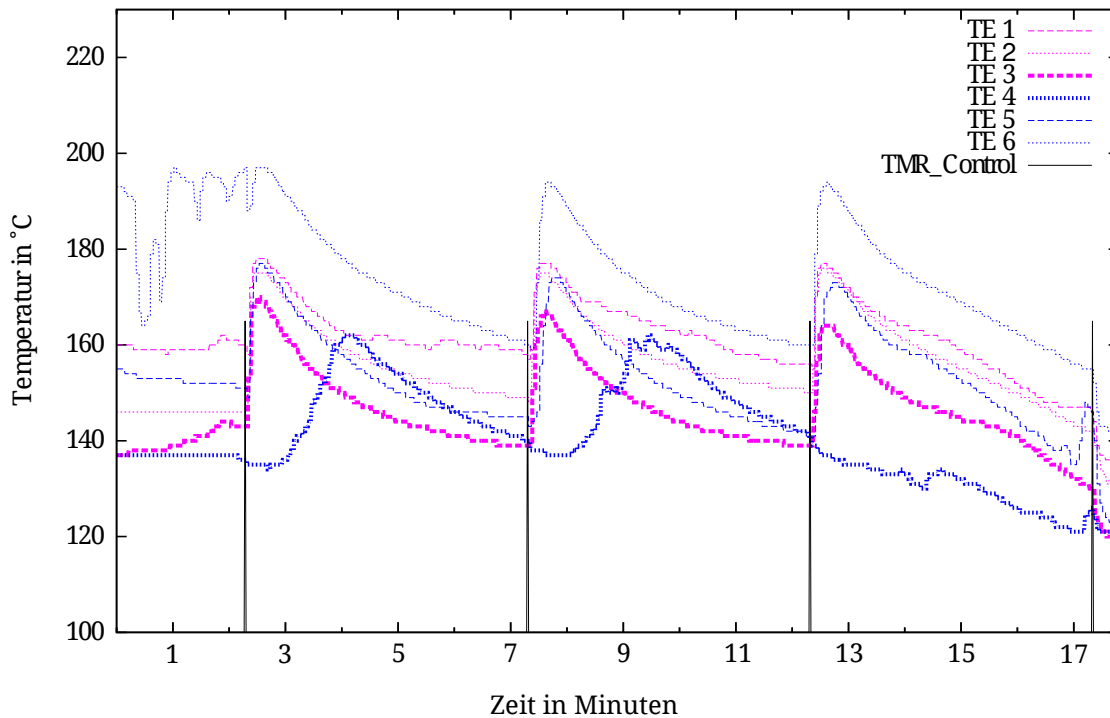


Abbildung 6.7: Temperaturverlauf der Partikel mit 10 g/s

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus diesem Versuch ist die gute Darstellbarkeit der Temperaturverteilung der Partikel um den Umfang des Receivers. In Abbildung 6.7 lassen sich Temperaturdifferenzen bis zu 30 K beobachten. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse konnte die gute Funktionalität des Messsystems eindeutig gezeigt werden.

Eine Ausnahme bildete dabei die Messkammer mit Thermoelement 4 bei dem ein verzögertes langsames Ansteigen der Temperatur erkennbar war, auch erreichte das Thermoelement dieser Kammer nicht die Temperaturniveaus der anderen Thermoelemente. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Verschlussring den Kammernaustritt nicht vollständig verschließen und sich daher nicht vollständig füllen konnte. Ein langsamer Temperaturanstieg ist also ein Indiz für sich langsame füllende Kammern, da die sich schon in der Kammer befindlichen Partikel schon wieder abkühlen und zusammen mit den neuen heißen Partikeln eine Mischtemperatur ergeben. Deswegen wird vermu-

tet, dass die wirkliche Temperatur der Partikel in Messkammer 4 höher liegt, als im Diagramm zu sehen ist. Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur in dieser Kammer, stellte sich wie auch bei den anderen Thermoelementen im TMR der Abkühlvorgang ein, der wie angenommen verläuft.

Eine weitere Erklärung wäre eine ungleiche Massenstromverteilung. Dies bedeutet, dass nicht an jeder Stelle des Receiverumfangs der gleiche Massenstrom vorherrscht und es somit passieren kann, dass einer Messkammer nur sehr wenige oder keine Partikel zugeführt werden und sich die Messkammer deswegen nicht füllen kann. Um die Gründe für den unerwarteten Temperaturverlauf von Thermoelement 4 genau analysieren zu können sind allerdings weitere Versuche und Analysen notwendig.

6.3.2 Massenstrom: 5 g/s

Für den Versuch mit einem mittleren Massenstrom von 5 g/s, zeigt sich der in Abbildung 6.8 zu sehende Temperaturverlauf im TMR. Die Charakteristik der Kurven entspricht der gleichen wie für den hohen Massenstrom von 10 g/s.

Bei der zweiten in Abbildung 6.8 dargestellten Entleerung der Messkammern tritt der Temperaturanstieg von Thermoelement 1 etwas verspätet ein. Zudem stellt sich hier nicht das erwartete Abkühlverhalten der Partikel ein, sondern die Temperatur steigt immer wieder kurzzeitig an.

Dieses Verhalten des Temperaturverlaufs ist ein gutes Beispiel für ein Fehlverhalten des Verschlussrings. Schließt die Messkammer nicht vollständig, so führt dies zu einer ungleichmäßigen Entleerung und Wiederbefüllung der betroffenen Messkammer, wodurch es zu unerwarteten Temperaturschwankungen kommt.

Das in 6.3.1 beschriebene Fehlverhalten von Thermoelement 4 konnte auch bei diesen Versuchen wieder festgestellt werden. Hierfür werden die selben Gründe wie schon in 6.3.1 beschrieben, angenommen.

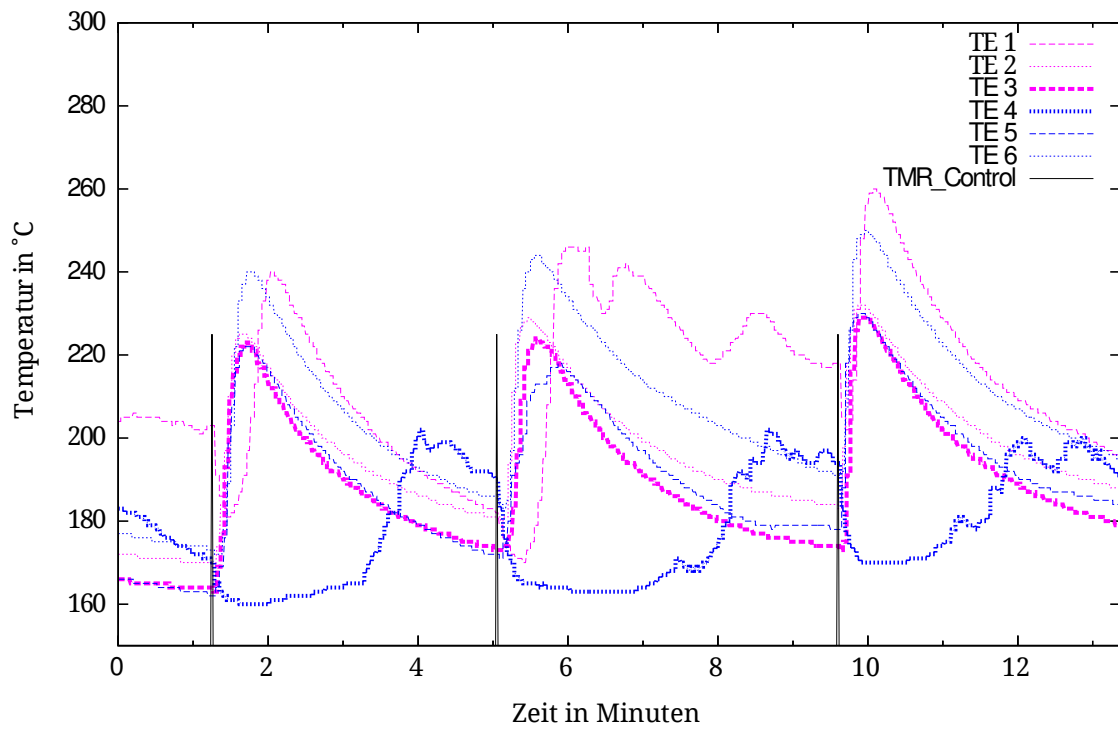


Abbildung 6.8: Temperaturverlauf der Partikel mit 5 g/s

6.3.3 Vergleich mit Aufnahmen der Wärmebildkamera

Bei einem weiteren Versuch wurde der Receiverauslass gleichzeitig mit einer Wärmebildkamera gefilmt. Der Receiver stand nun 45° um die Horizontale geneigt und es wurde eine Eingangsleistung von 4953 W eingekoppelt. Da der Emissionsgrad der Partikel im Receiver nicht genau bekannt ist, werden die Temperaturdaten der Wärmebildkamera nur für einen Vergleich der Größenordnung der mit dem TMR gemessenen Temperaturen herangezogen. Eine vollständige Validierung würde eine genaue Kenntnis des Emissionsgrades der Partikel voraussetzen, die an dieser Stelle nicht durchführbar war und deshalb für spätere Arbeiten hinten angestellt wird.

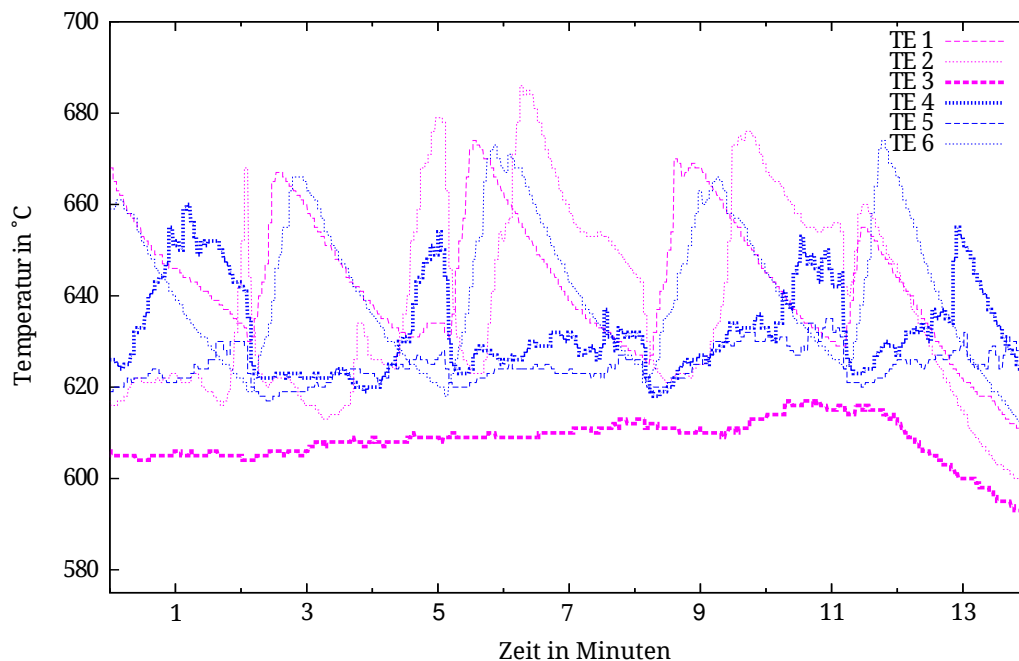


Abbildung 6.9: Temperaturverlauf der Partikel bei 4 Strahlern

Abbildung 6.9 zeigt den Temperaturverlauf in den Messkammern. Vergleicht man die Aufnahmen in Abbildung 6.9 und 6.10 miteinander, so zeigen beide Partikeltemperaturen um $680\text{ }^\circ\text{C}$. Aus diesem positiven Vergleich lässt sich schließen, dass auf die Richtigkeit der gemessenen Temperaturen vertraut werden kann und somit die Funktionalität des TMR mit automatisiertem Schließring als Messsystem zur Bestimmung der Partikeltemperatur im Zentrifugalreceiver gezeigt wurde.

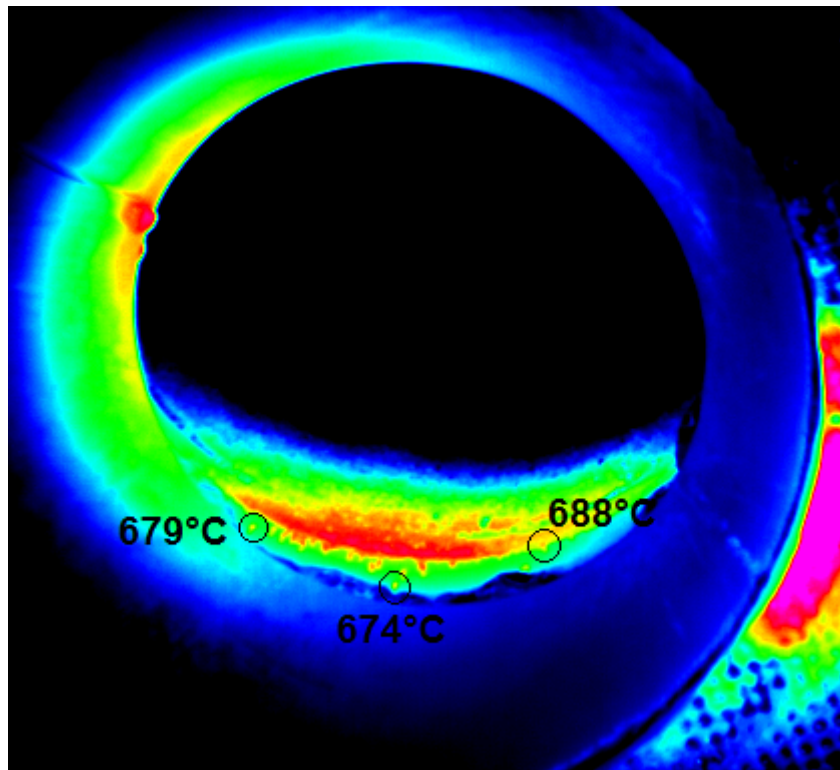


Abbildung 6.10: Temperatur der Partikel bei 4 Strahlern mit Wärmebildkamera

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung eines Zentrifugalreceivers, das ein vielversprechendes Receiverkonzept für Solarturmkraftwerke darstellt, wurden verschiedene Konzepte für die Messung der Temperatur des Wärmeträgermediums entworfen, aufgebaut und getestet. Die besondere Herausforderung hierbei ist, dass das Wärmeträgermedium aus kleinen Keramikpartikeln besteht, die aufgrund der Rotation des Receivers ständig in Bewegung sind.

Die verfolgten Konzepte lassen sich in eine zeitlich kontinuierliche und in eine periodische Temperaturbestimmung einteilen. Aufgrund der Notwendigkeit die Umfangsverteilung der Partikeltemperatur am Receiveraustritt bestimmen zu können, wurden schließlich nur Konzepte für die nachfolgenden Funktionstests ausgewählt, die mit dem Receiver rotieren und damit eine solche Verteilung darstellen können. Die wichtigsten Kriterien für Erstellung der Konzepte, waren eine kompakte Bauweise und die korrekte Temperaturmessung mit Berührungsthermometern in Schüttgütern.

In sogenannten Funktionstests wurden ausgewählte Konzepte in Versuchen ohne thermische Bestrahlung und eines Rapid-Prototyping-Modells des Konzeptes untersucht. Die Visualisierung dieser wurde mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera realisiert. In den ersten Versuchen konnte das Konzept des gedrosselten Massenflusses nicht in die Praxis umgesetzt werden und wurde daher nicht weiter verfolgt. Das Prinzip die Messkammern am TMR mit Impulsschlägen zu entleeren konnte zwar in 45° , jedoch nicht in 90° Receiverstellung in den Funktionstests realisiert werden. Auch die nachfolgenden Versuche das Prinzip der Impulsschläge auf außen liegende Messkammern anzuwenden haben keine Entleerung der Kammern bewirkt.

Durch die Erkenntnisse, die während der Funktionstests gesammelt wurden, konnte ein technisch aufwändiges, aber erfolgreiches Konzept entwickelt werden. Dieses zeichnet sich vor allem durch die Möglichkeit seiner Automatisierung und durch das Messen der Partikeltemperatur an diskreten Zeitpunkten aus.

Die Ergebnisse der Hochtemperaturversuche, die in Kapitel 6 beschrieben wurden haben die Funktionalität des Konzeptes belegt. Diese konnte auch für unterschiedliche Massenströme nachgewiesen werden. Dabei ergaben sich keine Einschränkungen, die im Bereich der getesteten Partikelmassenströmen zusammenhängen. Die gemessenen Temperaturen konnten auch mithilfe einer Wärmebildkamera verglichen werden. Dabei lagen die gemessenen und die mit der Wärmebildkamera ermittelten Temperaturen in der gleichen Größenordnung und es kann daher auf die Richtigkeit der Messergebnisse vertraut werden.

Das in Kapitel 6.3 beschriebene Problem der undichten Messkammern hat in den durchgeführten Tests die Funktionalität des Konzeptes nicht maßgeblich eingeschränkt, so dass die Partikeltemperaturen trotzdem richtig gemessen werden konnten. Für Langzeitversuche bedeutet allerdings eine einzelne, nicht korrekt funktionierende Messkammer schon eine eingeschränkte Funktionalität, da für diesen Umfangsbereich des Receivers dann keine Partikeltemperatur zur Verfügung steht. Sollten aufgrund undichten Messkammern mehrere Thermoelemente gleichzeitig keine nachvollziehbaren Werte liefern, wäre die Funktionalität des Messsystems nachhaltig beeinträchtigt. Aus diesen Gründen sollte dieses Problem weiter verfolgt und eine Lösung gefunden werden.

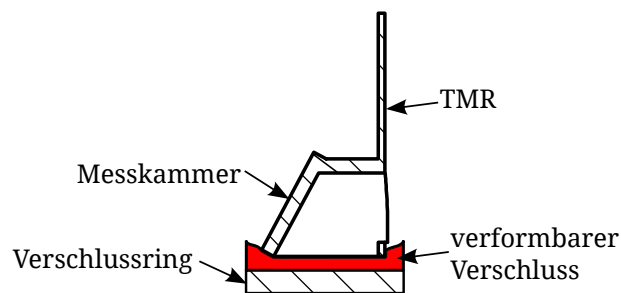


Abbildung 7.1: Verschlussring mit verformbarem Verschluss

Ein möglicher Lösungsansatz dafür wäre der Einbau von verformbaren Verschlüssen auf den existierenden Verschlussring. Diese würden so dimensioniert werden, dass sie sich aufgrund der Anpresskraft des Verschlussringes zwischen diesem und dem Austritt der Messkammern einklemmen und so die Messkammern zum Auslass hin abdichten, wie in Abbildung 7.1 zu sehen ist. Hierfür müssen jedoch geeignete hitzebeständige Materialien gefunden werden, da Partikeltemperaturen bis $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht werden können.

Eine weitere Fehlerquelle für undichte Messkammern sind Partikel, die beim Schließen der Messkammern gerade noch durch diese hindurch laufen. Diese können zwischen Verschlussring und Kammeraustritt eingeklemmt werden und somit ein für die Partikel undurchlässiger Verschluss der Messkammern nicht sichergestellt werden kann. Dies könnte durch eine konvexe Oberfläche der Verschlüsse am Verschlussring verhindert werden, wie in Abbildung 7.2 zu sehen ist.

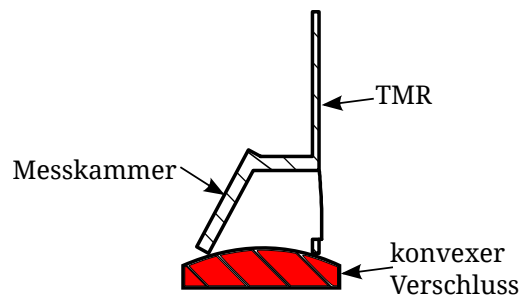


Abbildung 7.2: Verschlussring mit konvex geformten Verschlüssen

Diese Konzepte zur Verbesserung des Schließverhaltens müssen jedoch noch mit entsprechenden Versuchen weiter untersucht werden.

Zudem wurde durch den Vergleich der gemessenen Partikeltemperaturen mit den Aufnahmen der Wärmebildkamera qualitativ belegt, dass die Größenordnung der erzielten Werte korrekt ist. Für eine vollständige Validierung des Konzeptes müssen noch weitere Versuche durchgeführt werden. Dies könnte mit Partikeln durchgeführt werden, von denen der Emissionskoeffizient bekannt ist, um so eine quantitative Validierung der Temperaturmessung zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/media/pictures/DESERTEC_EU-MENA_map.jpg. – zugegriffen am 22. April 2013
- [2] http://www.dlr.de/dlr/presse/desktopdefault.aspx/tabid-10309/472_read-917/year-all/gallery/2037. – zugegriffen am 22. April 2013
- [3] GOBEREIT, Birgit: *Solare Partikelreceiver*. 2009. – Konzeptstudie
- [4] LIENEWEG, Fritz: *Handbuch der technischen Temperaturmessung*. Vieweg Verlag, 1976
- [5] STETTER, Heinz (Hrsg.): *Messtechnik an Maschinen und Anlagen*. Teubner Stuttgart, 1992
- [6] STIEGLITZ, Robert ; HEINZEL, Volker: *Thermische Solarenergie*. Springer, 2012
- [7] WEICHERT, Lothar u. a.: *Temperaturmessung in der Technik*. 4. Auflage. expert Verlag, 1987
- [8] WESSELAK, Viktor ; SCHABBACH, Thomas: *Regenerative Energietechnik*. 1. Auflage. Springer, 2009
- [9] WU, Wei u. a.: Direct Absorption Receivers for High Temperatures. In: *SolarPaces Granada Spain*, 2011

Abbildungsverzeichnis

1.1	weltweiter elektrischer Energiebedarf	10
1.2	Solarturm des DLR in Jülich	11
2.1	Aufbau und Funktionsweise des Fallfilmreceivers	13
2.2	schematischer Aufbau des Zentrifugalreceivers	14
2.3	Aufbau des Receivers im Schnitt	16
2.4	Aufbau des Receivers im Rahmen	17
3.1	Übersicht der Temperaturmessverfahren	19
3.2	Grundschtung eines Thermoelementes	20
3.3	richtige Position der Thermoelementspitze im Partikelvolumen	21
3.4	prinzipieller Aufbau eines Pyrometers	22
4.1	Aufbau des TMR mit senkrechten Messkammern	25
4.2	Aufbau des TMR mit Messschacht	27
4.3	Aufbau des TMR mit Schaber	28
4.4	Aufbau des TMR mit außen liegenden Messkammern	30
4.5	Aufbau der Drehbehälter	31
4.6	Aufbau des Verzögerungsringes	32
5.1	Aufbau des Versuchsstandes	36
5.2	Befüllung der Messkammern	37
5.3	Brückenbildung bei Partikeln	37
5.4	Brückenbildung in Messkammern unabhängig von Austrittsquerschnitt	38
5.5	Sicht auf die Messkammern 1, 2 und 3 mithilfe eines Spiegels	39
5.6	Sicht auf Messkammern 1, 2 und 3 von unten	39
5.7	Partikelfüllung der Messkammern 2, 3 und 7 vor dem Impulsstoß	40
5.8	Partikelfüllung der Messkammern 2, 3 und 7 kurz nach dem Impulsstoß	40

5.9	Partikelfüllung der Messkammern 2, 3 und 7 nach dem Impulsstoß	41
5.10	Füllung der Messkammern im TMR	41
5.11	Partikelfüllung der Messkammern 2 und 3 vor und nach dem Impulsstoß	42
5.12	Partikelfüllung der Messkammern 6, 5 und 3	43
5.13	Messkammern vor, bei und nach den Impulsstößen	44
5.14	Messkammern vor, bei und nach den Impulsstößen	45
6.1	Aufbau des TMR	47
6.2	Aufbau des des Verschlussringes	47
6.3	Lauftring, Führungsstangen und Rückstellfedern im rotierenden System am Receiver	48
6.4	Prinzip des Messsystems	49
6.5	Pneumatik-Kolben des statischen Systems	49
6.6	Schaltbild der Automatisierung des Temperatur-Messsystems	50
6.7	Temperaturverlauf der Partikel mit 10 g/s	52
6.8	Temperaturverlauf der Partikel mit 5 g/s	54
6.9	Temperaturverlauf der Partikel bei 4 Strahlern	55
6.10	Temperatur der Partikel bei 4 Strahlern mit Wärmebildkamera	56
7.1	Verschlussring mit verformbarem Verschluss	58
7.2	Verschlussring mit konvex geformten Verschlüssen	59

Anhang

Betriebsdaten der Komponenten für die Automatisierung des Verschlussringes aus Kapitel 6.2:

Komponente	Bezeichnung	Betriebsdaten
Kolben	Festo AEN-16-10-A-P-A	Betriebsdruck 6 <i>bar</i>
Ventil	Festo CPE10-M1BH-3OL-QS-6	Versorgungsspannung 24 <i>VDC</i>
Relais	Siemens	Schaltspannung 5 <i>VDC</i>
Spannungsgeber	ICP CON M-7024 DCON	Versorgungsspannung 24 <i>VDC</i> Ausgangsspannung 5 <i>VDC</i>
Netzteil	TDK Lambda DSP 10-24	Ausgangsspannung 24 <i>VDC</i>